



TESIS SF-142502

**PREPARASI ELEKTROLIT SOFC 8YSZ, 20 YBDC  
DAN PENGARUH CO-FIRING  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -20 YBDC  
PADA SIFAT LISTRIK**

BUDIANA  
1114 201 008

DOSEN PEMBIMBING  
Prof. Dr. Suasgoro, DEA

PROGRAM MAGISTER  
BIDANG KEAHLIAN MATERIAL  
JURUSAN FISIKA  
FAKULTAS MATEMATIKA DAN ILMU PENGETAHUAN ALAM  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016



THESIS SF-142502

**PREPARATION ELECTROLYTE SOFC 8YSZ,  
20 YBDC AND INFLUENCE OF CO-FIRING  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -  
20 YBDC ON ELECTRICAL CONDUCTIVITY**

BUDIANA  
1114 201 008

SUPERVISORS  
Prof. Dr. Suasgoro, DEA

MAGISTER PROGRAM  
STUDY ON MATERIAL PHYSICS  
DEPARTMENT OF PHYSICS  
FACULTY OF MATHEMATICS AND NATURAL SCIENCES  
INSTITUTE OF TECHNOLOGY SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2016

**Tesis disusun untuk memenuhi salah satu syarat memperoleh  
gelar  
Magister Sains (M.Si)  
di  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**


**oleh:  
Budiana  
NRP. 1114201008**

**Tanggal Ujian : 21 Juni 2016  
Periode Wisuda : September 2016**

**Disetujui oleh:**

**1. Prof. Dr. Suasgoro, DEA.  
NIP: 19550210 198010 1 001**

**(Pembimbing)**

  
(.....)

**2. Prof. Suminar Pratapa, Ph.D.  
NIP: 19660224 199002 1 001**

**(Penguji)**

  
(.....)

**3. Dr. M. Zainuri, M.Si.  
NIP: 19640130 199002 1 001**

**(Penguji)**

  
(.....)

**Direktur Program Pascasarjana,**



**Prof. Ir. Djanhar Manfaat, M.Sc. Ph.D.  
NIP. 19601202 198701 1 001**

# **PREPARASI ELEKTROLIT SOFC 8YSZ, 20 YBDC DAN PENGARUH CO-FIRING $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -20 YBDC PADA SIFAT LISTRIK**

Nama Mahasiswa : BUDIANA  
NRP : 1114201008  
Pembimbing : Prof. Dr. Suasgoro, DEA

## **ABSTRAK**

Studi tentang elektrolit 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8YSZ) dan 80 mol %  $\text{CeO}_2$ -20 mol %  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (20 YBDC) telah sukses dilakukan dengan proses pencampuran padat dan proses pemanasan substitusi. Fasa tunggal c-8YSZ dari serbuk campuran 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  terbentuk pada temperatur 1550 °C yang ditahan selama 4 jam dan fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  dari serbuk campuran  $\text{CeO}_2$ - $\text{Yb}_2\text{O}_3$  melalui reaksi padat telah terbentuk pada temperatur 1300 °C yang ditahan selama 16 jam. Fasa yang teridentifikasi dari masing-masing sampel adalah sebagai berikut. Pelet 8 YSZ memiliki fasa tunggal c-8YSZ ( $a=5,1385 \text{ \AA}$ ), pelet TP memiliki fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  ( $a=5,3169 \text{ \AA}$ ) dan pelet P memiliki fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  ( $a=5,3939 \text{ \AA}$ ). Penambahan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mengakibatkan terbentuknya fasa baru  $\text{CeO}_2$  kubik dengan parameter kisi ( $a=5,4254 \text{ \AA}$ ) dan  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  kubik dengan parameter kisi ( $a=10,5343 \text{ \AA}$ ). Plot  $\ln(\sigma T)$  terhadap  $\frac{1}{T}$  untuk masing-masing sampel menunjukkan 2 daerah energi aktivasi. Energi aktivasi yang dimiliki pelet 8YSZ pada  $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,38 \pm 0,05 \text{ eV}$  and  $T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ butir} = 1,12 \pm 0,02 \text{ eV}$ , pelet TP pada  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,54 \pm 0,03 \text{ eV}$  dan  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ butir} = 1,02 \pm 0,04 \text{ eV}$ , pelet P pada  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,61 \pm 0,04 \text{ eV}$  dan  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ butir} = 1,03 \pm 0,03 \text{ eV}$  dan pelet P+B pada  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,64 \pm 0,10 \text{ eV}$  dan  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ butir} = 1,01 \pm 0,03 \text{ eV}$ . Penambahan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  menurunkan energi aktivasi butir sebesar 0,02 eV pada  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Daerah  $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$  merupakan daerah konduktif 8YSZ sebagai elektrolit SOFC dan daerah  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$  merupakan daerah konduktif  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  sebagai elektrolit SOFC.

**Kata Kunci:** densitas, elektrolit, energi aktivasi, grain, substitusi

# PREPARATION ELECTROLYTE SOFC 8YSZ, 20 YBDC AND INFLUENCE OF CO-FIRING $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -20 YBDC ON ELECTRICAL CONDUCTIVITY

Name : BUDIANA  
NRP : 1114201008  
Supervisor : Prof. Dr. Suasmoro, DEA

## ABSTRACT

The study of electrolyte 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8YSZ) and 80 mol %  $\text{CeO}_2$ -20 mol %  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (20 YBDC) has been carried out successfully with solid mixing process and heating process of substitution. Phase c-8YSZ formed at temperature 1550 °C with holding time 4 h and phase  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  formed at temperature 1300 °C with holding time 16 h. Phase identification revealed that for 8 YSZ sample was c-8YSZ ( $a=5,1385 \text{ \AA}$ ), TP sampel showed  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  cubic phase ( $a=5,3169 \text{ \AA}$ ) and P sample was  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  cubic phase ( $a=5,3939 \text{ \AA}$ ). The addition of 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  resulted 2 new phase form were  $\text{CeO}_2$  cubic ( $a=5,4254 \text{ \AA}$ ) and  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  cubic ( $a=10,5343 \text{ \AA}$ ). Plot  $\ln(\sigma T)$  versus  $\frac{1}{T}$  for each samples possed 2 rezime activation energy, 8YSZ sample at  $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ grain} = 0,38 \pm 0,05 \text{ eV}$  and  $T < 700 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ grain} = 1,12 \pm 0,02 \text{ eV}$ , sample TP at  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ grain} = 0,54 \pm 0,03 \text{ eV}$  and  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ grain} = 1,02 \pm 0,04 \text{ eV}$ , sampel P at  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ grain} = 0,61 \pm 0,04 \text{ eV}$  and  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ grain} = 1,03 \pm 0,03 \text{ eV}$  while for sampel P+B at  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $E_a \text{ grain} = 0,64 \pm 0,10 \text{ eV}$  and  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$   $E_a \text{ grain} = 1,01 \pm 0,03 \text{ eV}$ . The addition of 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  decrease activation energy until 0,02 eV at  $T < 650 \text{ }^\circ\text{C}$ . Region at  $T > 700 \text{ }^\circ\text{C}$  was conductive region of 8YSZ as electrolyte SOFC and region at  $T > 650 \text{ }^\circ\text{C}$  was conductive region of  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  as electrolyte SOFC.

**Keywords:** activation energy, density, electrolyte, grain, substitution

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL</b>	
<b>COVER PAGE</b>	
<b>LEMBAR PENGESAHAN</b>	<b>i</b>
<b>ABSTRAK</b>	<b>ii</b>
<b>ABSTRACT</b>	<b>iii</b>
<b>KATA PENGANTAR</b>	<b>iv</b>
<b>DAFTAR ISI</b>	<b>v</b>
<b>DAFTAR TABEL</b>	<b>vii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR</b>	<b>x</b>
<b>DAFTAR LAMPIRAN</b>	<b>xi</b>

### **BAB 1 PENDAHULUAN**

1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	4
1.3 Tujuan Penelitian	4
1.4 Manfaat Penelitian	4

### **BAB 2 KAJIAN PUSTAKA**

2.1 Solid Oxide Fuel Cell	5
2.2 Metode Preparasi elektrolit	11
2.3 Proses Sinter	15
2.4 Konduktivitas elektrolit	19
2.5 Model Rangkaian Listrik	22

### **BAB 3 METODOLOGI PENELITIAN**

3.1 Bahan	23
3.2 Alat	23
3.3 Prosedur Kerja	23
3.4 Karakterisasi sampel	24
3.5 Diagram alir penelitian	26

### **BAB 4 HASIL DAN PEMBAHASAN**

4.1 Hasil Pencampuran reaksi padat dan Proses Substitusi	29
4.1.1 Hasil Pencampuran reaksi padat dan Proses Substitusi	
Bahan $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$ (8 YSZ)	29

4.1.2 Hasil Pencampuran reaksi padat dan Proses Substitusi	
Bahan $\text{CeO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$ (20YBDC).....	30
4.2 Hasil Pengujian PSA (Particle Size Analysis) .....	35
4.3 Sinter .....	34
4.3.1 Sinter serbuk campuran 8YSZ .....	36
4.3.2 Sinter serbuk campuran 20YBDC.....	38
4.4 Perhitungan Densitas .....	43
4.5 Pengujian SEM .....	45
4.6 Karakterisasi Sifat Listrik .....	48
4.6.1 Kalibrasi Induktansi Parasitik .....	49
4.6.2 Nilai Impedansi Semua Sampel .....	52
4.6.3 Nilai Impedansi pada beberapa temperatur.....	54
4.6.4 Perhitungan nilai resistansi .....	57
4.6.5 Perhitungan nilai konduktivitas.....	59
<b>BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN</b>	
5.1 Kesimpulan .....	67
5.2 Saran.....	68
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>	<b>69</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>	<b>73</b>
<b>BIODATA PENULIS .....</b>	<b>125</b>

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 4.1</b> Nilai ukuran untuk masing-masing peak pada serbuk S16.....	36
<b>Tabel 4.2</b> Nilai <i>figures-of-merits</i> untuk masing-masing pelet. ....	39
<b>Tabel 4.3</b> Nilai <i>figures-of-merits</i> untuk pelet P+B dengan input 3 fasa .....	41
<b>Tabel 4.4</b> Nilai <i>figures-of-merits</i> untuk pelet P+B dengan input 2 fasa .....	42
<b>Tabel 4.5</b> Nilai densitas untuk masing-masing sampel.....	43
<b>Tabel 4.6</b> Nilai resistansi dari sampel 8YSZ .....	57
<b>Tabel 4.7</b> Nilai resistansi dari sampel TP .....	57
<b>Tabel 4.8</b> Nilai resistansi dari sampel P.....	57
<b>Tabel 4.9</b> Nilai resistansi dari sampel P+B.....	58
<b>Tabel 4.10</b> Nilai resistansi dari semua sampel pada T= 400 °C dan T=450 °C	59
<b>Tabel 4.11</b> Nilai Energi aktivasi butir untuk sampel 8YSZ.....	61
<b>Tabel 4.12</b> Nilai Energi aktivasi butir+batas butir untuk sampel 8YSZ.....	61
<b>Tabel 4.13</b> Nilai Energi aktivasi butir untuk masing-masing sampel .....	64
<b>Tabel 4.14</b> Nilai Energi aktivasi butir+batas butir untuk semua sampel.....	64



## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b> Sistem SOFC.....	6
<b>Gambar 2.2</b> Struktur Fluorite pada $\text{CeO}_2$ .....	9
<b>Gambar 2.3</b> Ilustrasi (a-b) tetrahedral dan (c-g) oktahedral untuk struktur Fluorite $\text{CeO}_2$ .....	9
<b>Gambar 2.4</b> Konduktivitas ionik pada Ceria yang didoping alkaline oksida bumi pada temperatur 1073 °K.....	10
<b>Gambar 2.5</b> Struktur Ceria yang didoping dopan Yb.....	11
<b>Gambar 2.6</b> Pola XRD pada aliovalent yang mendoping ceria untuk berbagai metode sintesis pada bahan Nd doped Ce.....	12
<b>Gambar 2.7</b> a.Nilai densitas relatif sampel 20 NDC dengan berbagai metode preparasi b. Nilai densitas relatif untuk berbagai variasi sampel .....	12
<b>Gambar 2.8</b> Representasi skematik pada <i>planetary ball mill</i> .....	13
<b>Gambar 2.9</b> Skema metode reaksi padat yang membentuk susunan baru.....	14
<b>Gambar 2.10</b> Skema proses pencampuran serbuk dengan reaksi padat.....	14
<b>Gambar 2.11</b> 6 Mekanisme yang berbeda selama proses densifikasi.....	16
<b>Gambar 2.12</b> 6 Mekanisme yang berbeda selama proses densifikasi.....	17
<b>Gambar 2.13</b> Tahapan tahapan yang terjadi pada sintering fasa cair.....	18
<b>Gambar 2.14</b> Perpindahan (migrasi) ion pada kristal a. tanpa adanya medan b. Terdapat medan.....	20
<b>Gambar 2.15</b> Hubungan antara $1/T$ dengan $\ln(\sigma T)$ pada konduktivitas bulk, konduktivitas <i>grain boundary</i> dan <i>chemical conductivity</i> .....	21
<b>Gambar 2.16</b> Hubungan antara temperatur $1/T$ dengan $\ln(\sigma T)$ terhadap variasi komposisi YbDC.....	21
<b>Gambar 2.17</b> Plot hubungan antara dua impedansi yaitu impedansi real ( $Z'$ ) dengan impedansi imajiner ( $-Z''$ ).....	22
<b>Gambar 3.1</b> Diagram alir penelitian 8YSZ.....	26
<b>Gambar 3.2</b> Diagram alir penelitian 20 YBDC.....	27
<b>Gambar 4.1</b> Pola-pola difraksi untuk serbuk $\text{ZrO}_2$ , serbuk $\text{Y}_2\text{O}_3$ dan serbuk campuran (SC) 92 mol % $\text{ZrO}_2$ -8 mol % $\text{Y}_2\text{O}_3$ (8YSZ).....	29

<b>Gambar 4.2</b> Pola-pola difraksi untuk serbuk $\text{Yb}_2\text{O}_3$ , serbuk $\text{CeO}_2$ dan serbuk campuran $\text{CeO}_2$ <i>doped</i> $\text{Yb}_2\text{O}_3$ .....	30
<b>Gambar 4.3</b> Pola difraksi untuk serbuk $\text{CeO}_2$ <i>doped</i> $\text{Yb}_2\text{O}_3$ variasi temperatur dengan waktu tahan 2 jam.....	32
<b>Gambar 4.4</b> Pola-pola difraksi untuk serbuk $\text{CeO}_2$ <i>doped</i> $\text{Yb}_2\text{O}_3$ variasi waktu tahan dengan $T=1300\text{ }^\circ\text{C}$ .....	32
<b>Gambar 4.5</b> Contoh pola hasil penghalusan serbuk S-1100 dengan menggunakan metode Rietveld.....	33
<b>Gambar 4.6</b> Nilai persentase mol untuk semua serbuk variasi temperatur dengan waktu tahan selama 2 jam.....	33
<b>Gambar 4.7</b> Nilai persentase berat untuk serbuk campuran $\text{CeO}_2$ yang didoping $\text{Yb}_2\text{O}_3$ terhadap variasi waktu tahan.....	34
<b>Gambar 4.8</b> Hasil pengujian <i>Particle size analysis</i> untuk serbuk S16.....	35
<b>Gambar 4.9</b> Pola difraksi sinar -x pada pelet 8YSZ yang disinter pada temperatur $1550\text{ }^\circ\text{C}$ selama 4 Jam.....	36
<b>Gambar 4.10</b> Pola-pola difraksi pada sampel P (pemanasan) dan TP (tanpa pemanasan) yang disinter pada temperatur $1350\text{ }^\circ\text{C}$ selama 20 jam....	38
<b>Gambar 4.11</b> Pola difraksi sinar-x pada pelet P+B yang disinter pada temperatur $1100\text{ }^\circ\text{C}$ selama 8 jam.....	40
<b>Gambar 4.12</b> Pola hasil penghalusan pelet P+B dengan menggunakan metode Rietveld 3 fasa. ....	42
<b>Gambar 4.13</b> Pola hasil penghalusan pelet P+B dengan menggunakan metode Rietveld 2 fasa.....	43
<b>Gambar 4.14</b> Mikrostruktur semua pelet .....	46
<b>Gambar 4.15</b> Distribusi Ce dan Yb hasil SEM-EDX.....	48
<b>Gambar 4.16</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> pada temperatur $450\text{ }^\circ\text{C}$ sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet 8YSZ.....	49
<b>Gambar 4.17.</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> pada temperatur $450\text{ }^\circ\text{C}$ sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet TP .....	50
<b>Gambar 4.18</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> pada temperatur $450\text{ }^\circ\text{C}$ sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet P .....	50

<b>Gambar 4.19</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> pada temperatur 450 °C sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet P+B.....	51
<b>Gambar 4.20</b> <i>Complex plane plots</i> untuk semua pelet dari frekuensi 32MHZ -0,1 mHz pada temperatur 100 °C .....	52
<b>Gambar 4.21</b> <i>Complex plane plots</i> untuk semua pelet dari frekuensi 32MHZ -0,1 mHz pada temperatur 150 °C.....	52
<b>Gambar 4.22</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> untuk semua sampel dari frekuensi 32MHZ -0,1 mHz pada temperatur T= 400 °C.....	53
<b>Gambar 4.23</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> variasi temperatur pada sampel 8YSZ dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz .....	55
<b>Gambar 4.24</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> variasi temperatur pada sampel TP dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz .....	55
<b>Gambar 4.25</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> variasi temperatur pada sampel P dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz .....	56
<b>Gambar 4.26</b> Contoh <i>Complex plane plots</i> variasi temperatur pada sampel P+B dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz .....	56
<b>Gambar 4.27</b> Hubungan antara temperatur (1/T) dengan $\ln(\sigma T)$ pada sampel 8YSZ untuk butir.....	60
<b>Gambar 4.28</b> Hubungan antara temperatur (1/T) dengan $\ln(\sigma T)$ pada sampel 8YSZ untuk butir dan batas butir.....	60
<b>Gambar 4.29</b> Hubungan antara temperature (1/T) dengan $\ln(\sigma T)$ pada sampel 8YSZ $T < 750$ °C.....	61
<b>Gambar 4.30</b> Hubungan antara temperatur (1/T) dengan $\ln(\sigma T)$ pada semua sampel untuk butir.....	63
<b>Gambar 4.31</b> Hubungan antara temperature (1/T) dengan $\ln(\sigma T)$ pada semua sampel butir+batas butir .....	64

## DAFTAR LAMPIRAN

<b>Lampiran A</b> (Perhitungan Massa/mol) .....	73
<b>Lampiran B</b> (Hasil Analisa dengan software <i>Match!2</i> ).....	75
<b>Lampiran C</b> (Rekapitulasi hasil <i>refinement</i> ) .....	83
<b>Lampiran D</b> ( <i>Coding matlab</i> ) .....	91
<b>Lampiran E</b> (Slope perhitunagn Konduktivitas).....	117

# BAB I

## PENDAHULUAN

### 1.1. Latar Belakang

Sumber energi yang digunakan untuk menghasilkan listrik sebagian besar berasal dari bahan bakar fosil (Bauer et al., 2016). Penggunaan bahan bakar fosil telah menimbulkan masalah terhadap lingkungan seperti timbulnya pemanasan global, penipisan lapisan ozon dan polusi udara (Bilgen, 2014). Di sisi lain, bahan bakar fosil merupakan sumber energi tak terbarukan sehingga pemakaian sumber energi ini perlu dibatasi. Kondisi ini berbanding terbalik dengan jumlah penduduk dan kebutuhan energi yang semakin meningkat dari tahun ke tahun (Uimonen et al., 2016)(Bilgen, 2014). Salah satu solusi yang dapat diterapkan dari permasalahan tersebut adalah penggunaan *fuel cell* (Alaswad et al., 2016).

*Fuel cell* merupakan sebuah peralatan konversi energi yang memproduksi listrik secara langsung dari bahan bakar melalui kombinasi proses elektrokimia antara anoda dan katoda pada bahan bakar dengan oksida (Alaswad et al., 2016) (Shri Prakash et al., 2014). *Fuel cell* memiliki keunggulan jika dibandingkan dengan pembangkit listrik konvensional yaitu memiliki efisiensi konversi energi yang tinggi (45-60%) (Milewski et al., 2011), tidak menimbulkan pemanasan global dan tidak menghasilkan NO<sub>x</sub> dan SO<sub>x</sub> (Minh and Takahashi, 1995). Berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan *fuel cell* terbagi menjadi *polymer electrolyte membrane fuel cell* (PEMFCs), *molten carbonate fuel cell* (MCFC), *direct methanol fuel cell* (DMFC), *alkaline fuel cell* (AFC), *phosphoric acid fuel cell* (PAFC), dan *solid oxide fuel cell* (SOFC) (Milewski et al., 2011).

SOFC merupakan jenis *fuel cell* yang dapat menghasilkan daya keluaran 100-100.000 kW dan dapat diaplikasikan pada *power generation* dan sistem transportasi (Ginley dan Cahen, 2012). SOFC memiliki kelebihan dibandingkan dengan jenis *fuel cell* yang lainnya yaitu dapat menggunakan banyak alternatif bahan bakar dan sistem *desain* yang sederhana (Salogni dan Colonna, 2010). Secara umum, SOFC tersusun oleh anoda, elektrolit dan katoda (Minh dan Takahashi, 1995). Proses reduksi dan oksida yang terjadi pada elektroda dapat berlangsung ketika terdapat elektrolit yang berada di antara keduanya. Elektrolit yang digunakan

harus memiliki sifat yang stabil secara kimia dan fisika serta memiliki temperatur kerja yang tidak terlalu tinggi, berkisar pada *range* 500-800° C (Zhu and Fan, 2005) (Leng et al., 2004).

Elektrolit merupakan bagian SOFC yang berfungsi untuk membawa ion yang dihasilkan pada salah satu elektroda ke elektroda lainnya. Bahan yang telah digunakan sebagai elektrolit pada SOFC adalah Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, LSGM dan ZrO<sub>2</sub>. Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dengan  $\delta$  phase memiliki konduktivitas ionik yang tinggi sekitar 0,1 S/cm pada T= 500 °C (N.Q Minh, dkk. 1994). Namun, Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mudah tereduksi menjadi logam Bi dalam pemanasan dengan karbon atau hidrogen dan mudah tereduksi dengan gas karbon monoksida menjadi BiO. Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> yang ditambahkan dopan dapat menyebabkan transformasi menjadi fasa rombohedral yang mudah terdekomposisi pada suhu 700 °C. Dekomposisi inilah yang dihindari pada SOFC (Fergus et al., 2008). Elektrolit LGSM merupakan elektrolit berbasis La, Sr, Ga dan Mg. Elektrolit LGSM merupakan elektrolit yang mempunyai unsur kompleks sehingga jarang digunakan, selain itu elektrolit LGSM mudah mengalami dekomposisi selama proses SOFC berlangsung sehingga dapat menurunkan konduktivitas ioniknya (Fergus et al., 2008).

Material yang paling banyak digunakan selain Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan LSGM adalah ZrO<sub>2</sub> dan CeO<sub>2</sub> (Fergus et al., 2008). ZrO<sub>2</sub> memiliki fasa monoklinik, tetragonal dan kubik (Zakeri et al., 2014). ZrO<sub>2</sub> yang sering digunakan sebagai SOFC adalah ZrO<sub>2</sub> dengan fasa kubik (Zhu and Fan, 2005). Fasa kubik dipilih karena struktur kristalnya paling stabil dibandingkan dengan fasa monoklinik dan tetragonal (Barsoum dan Barsoum, 2002). ZrO<sub>2</sub> dapat memiliki fasa kubik pada temperatur yang relatif rendah jika didoping dengan bahan CaO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Chiang et al., 1996). Pemberian doping CaO, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> dan Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> pada bahan ZrO<sub>2</sub> menyebabkan terjadinya transformasi fasa dari monoklinik ke tetragonal dan ke kubik dengan variasi konsentrasi dopan dan variasi temperatur. Komposisi ZrO<sub>2</sub> yang telah digunakan untuk SOFC adalah 8 mol % Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-92 mol % ZrO<sub>2</sub> (8YSZ) (Van Gestel et al., 2015)(Han et al., 2007). Elektrolit 8YSZ memiliki stabilitas dan kompatibilitas yang relatif tinggi terhadap material elektroda pada berbagai *range* temperatur, memiliki konduktivitas ionik tertinggi (1S/cm) pada T= 1070-1270 °K (Kazlauskas et al., 2012).

Bahan  $\text{CeO}_2$  memiliki struktur yang sama dengan  $\text{ZrO}_2$  yaitu *fluorite*.  $\text{CeO}_2$  hanya memiliki fase kubik sampai *melting pointnya*, sehingga tidak terjadi perubahan fasa selama beroperasi pada temperatur SOFC (500-1000 °C). Namun,  $\text{CeO}_2$  murni bukan merupakan konduktor ion oksigen yang baik ( $\sigma = 2,41 \times 10^{-4}$  S/cm)(Fergus et al., 2008). Konduktivitas ion oksigen dari  $\text{CeO}_2$  dapat dibuat dengan melakukan doping valensi rendah. Salah satu dopan yang bisa digunakan adalah  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ . Ion  $\text{Yb}^{3+}$  memiliki radius ionik (98,5 pm) yang hampir sama dengan ion  $\text{Ce}^{4+}$  (97 pm) (Matović et al., 2014). Selain dari nilai jari-jarinya yang hampir sama,  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  memiliki fase kubik sehingga dapat meningkatkan kestabilan fasa kubik pada  $\text{CeO}_2$ . Berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Matović et al (2014), konsentrasi paling baik dari  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  yang dapat digunakan sebagai elektrolit SOFC adalah 20 mol %.

Metode preparasi yang dapat dilakukan untuk proses pendopingan Yb terhadap Ce adalah metode *self-propagating room temperature* (Matović et al., 2014), *CNA combustion methode* (Esther Jeyanthi et al., 2015), *microemulsion methode* (Małecka dan Kępiński, 2012), *ammonium carbonate coprecipitation* (Ye et al., 2007) dan *solid state reaction* (Nigara et al., 2001).

Metode *solid state reaction* memiliki keunggulan dibandingkan metode preparasi pendopingan yaitu mudah dilakukan selama proses pencampuran, mendapatkan hasil serbuk yang relatif lebih banyak serta nilai stoikiometrinya lebih akurat karena tahapan reaksi yang terjadi singkat (Fergus et al., 2008)(Nigara et al., 2001). Namun, metode *solid state reaction* memiliki kelemahan yaitu temperatur sinter yang relatif lebih tinggi (1500-1700 °C) (Stojmenović et al., 2014)(Guan et al., 2015). Salah satu bahan yang dapat digunakan untuk menurunkan temperatur sinter yaitu *co-firing*  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (Sebastian et al., 2016)(Jaiswal et al., 2015)(Fu et al., 2008). Bahan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  dapat menurunkan suhu sinter melalui mekanisme *liquid phase sintering* (Chiang et al., 1996)(Barsoum dan Barsoum, 2002). Penambahan bahan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  dapat meningkatkan konduktivitas ionik dan dapat menurunkan harga aktivasi pada daerah temperatur tertentu (Fu et al., 2008). M. Saukani (2014) telah melaporkan bahwa konsentrasi terbaik  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  yang dapat diberikan adalah 4 mol%, dengan penambahan 4 mol% densitas yang dihasilkan adalah 96%.

Berdasarkan hasil kajian pustaka yang telah dilakukan. Penelitian ini difokuskan pada preparasi pencampuran dan pendopingan dua elektrolit serta karakterisasi sifat listrik pada daerah temperatur 100-850 °C. Elektrolit pertama adalah berbasis  $\text{ZrO}_2$  dengan komposisi  $\text{ZrO}_2$  (92 mol %) dan  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8 mol%) (8YSZ). Elektrolit kedua adalah berbasis  $\text{CeO}_2$  dengan komposisi  $\text{CeO}_2$  (80 mol%) dan  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (20 mol %) (20 YBDC). Metode pencampuran yang digunakan pada dua elektrolit adalah menggunakan metode reaksi padat. Selain dari itu, pada penelitian ini akan dikaji pengaruh penambahan *co-firing* 4% mol  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  pada serbuk campuran  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (20 mol %) dan  $\text{CeO}_2$  (80 mol%).

## 1.2. Perumusan Masalah

Permasalahan yang mendasari penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Bagaimana mendapatkan fasa tunggal 8YSZ dan  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  melalui metode reaksi padat ?
2. Bagaimana pengaruh penambahan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  terhadap fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  ?
3. Bagaimana karakterisasi sifat listrik dari 8 YSZ,  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  dan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  pada temperatur 100-850 °C?

## 1.3. Tujuan Penelitian

Penelitian ini dilakukan dengan tujuan:

1. Mendapatkan fasa tunggal 8YSZ dan  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  melalui metode reaksi padat.
2. Mendapatkan informasi mengenai pengaruh penambahan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  terhadap fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$ .
3. Mendapatkan nilai karakterisasi sifat listrik (nilai impedansi real dan imajiner) untuk semua sampel pada temperatur 100-850 °C.

## 1.4. Manfaat Penelitian

Penelitian ini diharapkan dapat memberikan informasi mengenai bahan keramik 8 YSZ dan 20 YBDC sebagai elektrolit SOFC.



## BAB II

### KAJIAN PUSTAKA

#### 2.1 Solid Oxide Fuel cell (SOFC)

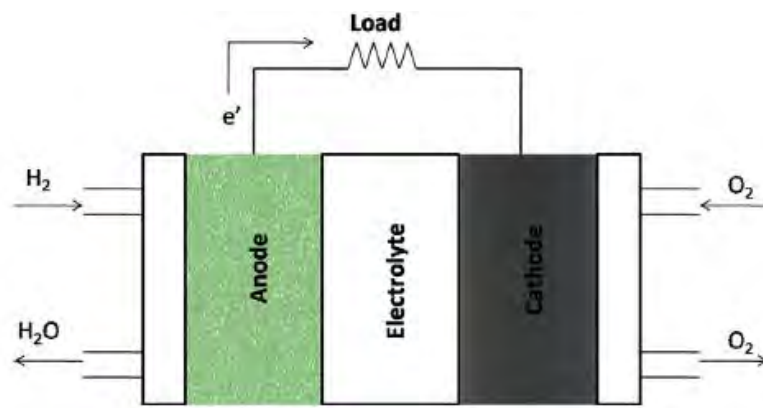
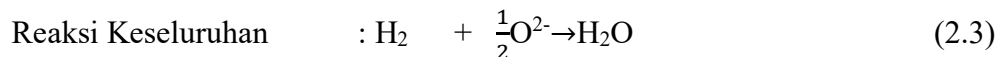
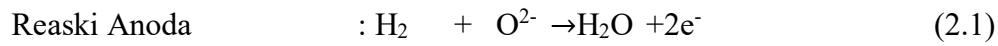
*Fuel cell* adalah sebuah perangkat yang dapat menghasilkan listrik melalui proses reduksi-oksidasi secara spontan dari dua elektroda yang digunakan katoda dan anoda (Alaswad et al., 2016). *Fuel cell* berdasarkan jenis elektrolit yang digunakan dapat dibagi menjadi 5 jenis yaitu *solid oxide fuel cell* (SOFC), *molten carbonate fuel cell* (MCFC), *phosphoric acid fuel cell* (PAFC), *proton exchange membrane* (PEMFC), *alkaline fuel cell* (AFC), dan *direct methanol fuel cell* (DMFC) (Milewski et al., 2011). Jenis *fuel cell* yang dapat menghasilkan daya tertinggi adalah SOFC. SOFC memiliki daya keluaran sebesar 100-100.000 kW. Berdasarkan daya yang dihasilkan, SOFC banyak dikembangkan sebagai alternatif energi yang digunakan untuk menghasilkan listrik (Ginley dan Cahen, 2012).

SOFC merupakan perangkat elektrokimia yang mengubah energi kimia dari bahan bakar menjadi energi listrik (Fergus et al., 2008). Bahan bakar gas yang biasa digunakan adalah hidrokarbon ( $H_2$ , CO,  $CH_4$ ) dan alkohol sedangkan oksida yang digunakan adalah  $O_2$ . Bahan bakar gas yang sering digunakan adalah  $H_2$ . Alasan pemilihan bahan bakar tersebut lebih mudah selama proses dilakukan. SOFC memiliki efisiensi yang relatif lebih tinggi (45-65%) (Milewski et al., 2011), tidak menggunakan katalis platinum atau ruthenium selama proses berlangsung, memiliki daya tahan sel yang baik karena memiliki toleransi yang baik terhadap pengotor seperti sulfur dalam bahan bakar dan produk emisi yang dihasilkan rendah (Zhang, 2015), ukurannya dari SOFC dapat dibuat sesuai dengan tujuan yang diharapkan (dapat mudah ditingkatkan atau diturunkan) karena nilai efisiensi dari SOFC relatif tidak bergantung pada ukuran (Salogni dan Colonna, 2010).

SOFC disusun oleh anoda, katoda, *interconnect*, dan elektrolit (Minh dan Takahashi, 1995). Proses yang berlangsung pada SOFC adalah reduksi dan oksidasi pada elektroda. Bahan bakar dan oksidan yang sering digunakan selama proses SOFC adalah hidrogen dan oksigen. Hidrogen dialirkan pada anoda sedangkan gas oksigen dialirkan pada katoda. Material yang sering digunakan untuk anoda adalah Ni-YSZ dengan mereduksi terlebih dahulu NiO menjadi Ni sehingga memiliki

konduktivitas elektronik yang tinggi (Shri Prakash et al., 2014) sedangkan material yang sering digunakan untuk katoda adalah material  $\text{SrCO}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_{3-\delta}$  (Wang et al., 2010).

Reaksi elektrokimia yang terjadi pada SOFC dengan menggunakan gas  $\text{H}_2$  adalah sebagai berikut:



**Gambar 2.1.** Sistem SOFC (anoda, elektrolit dan katoda) (Shri Prakash et al., 2014).

Pada katoda, persamaan reduksi pada oksigen yang bergantung pada konduktor ionik dari elektrolit dapat dituliskan sebagai berikut:



*subscripts* (c) dan (e) menunjukkan keadaan pada katoda dan elektrolit. Sedangkan keadaan pada anoda dapat dituliskan reaksi balik sebagai berikut:



Subscript dari a menunjukkan keadaan pada anoda. Konsekuensi dari dua persamaan diatas membuat persamaan reaksinya menjadi



Berdasarkan persamaan diatas, SOFC hanya dipengaruhi oleh konsentrasi oksigen didalam sel. Nilai *electromotive force* atau tegangan reversible  $E_r$  dari *Fuel cell* diberikan oleh persamaan Nernst

$$E_r = \frac{RT}{4F} \ln \frac{P_{O_{2c}}}{P_{O_{2a}}} \quad (2.7)$$

dimana R menyatakan konstanta gas, T untuk temperatur, F dinyatakan dalam faraday,  $P_{O_{2c}}$  menyatakan tekanan oksigen pada katoda,  $P_{O_{2a}}$  menyatakan tekanan oksigen pada anoda (Minh dan Takahashi, 1995).

Proses reduksi dan oksidasi yang terjadi pada elektroda dapat berlangsung ketika terdapat elektrolit yang berada diantara keduanya. Elektrolit dalam SOFC berperan penting selama terjadinya proses elektrokimia untuk menghasilkan listrik. Selama beroperasi pada SOFC, elektrolit berfungsi untuk membawa ion yang dihasilkan pada salah satu elektroda ke elektroda lainnya, menyeimbangkan muatan dari aliran elektron dan mengisi serta memenuhi rangkaian listrik didalam *fuel cell*, dan memisahkan bahan bakar dari oksidan di dalam *fuel cell* (Minh dan Takahashi, 1995).

Elektrolit yang digunakan pada SOFC harus stabil secara kimia, morfologi dan dimensi pada saat terjadinya reaksi oksidasi dan reduksi selama *fuel cell* beroperasi. Jika digabungkan dengan katoda dan anoda tidak mengalami transformasi fasa diantara temperatur ruang dan temperatur fabrikasi. Elektrolit harus memiliki konduktivitas ionik yang tinggi sehingga dapat meminimalisir *ohmic losses*. Elektrolit harus memiliki kompatibilitas terhadap bagian *fuel cell* yang lainnya. Selama proses terjadi, tidak ada interaksi kimia yang merusak atau interdifusi dengan material lainnya. Elektrolit harus memiliki ekspansi termal yang mendekati ekspansi termal anoda dan katoda. Elektrolit harus mampat dan padat untuk mencegah terjadinya kebocoran gas dari anoda ke katoda ataupun sebaliknya (Fergus et al., 2008)(Minh dan Takahashi, 1995).

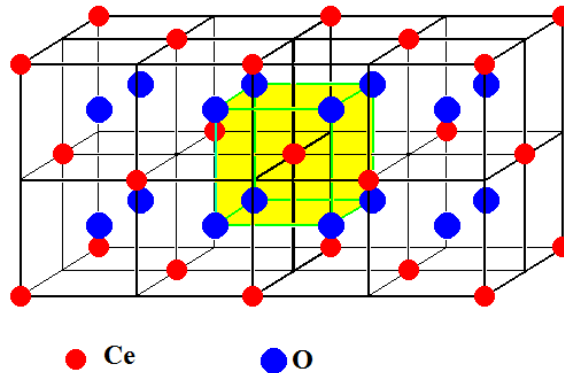
Material yang dapat digunakan sebagai elektrolit adalah zirkonia yang distabilisasi ( $\text{CaO-ZrO}_2$ ,  $\text{Y}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ,  $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-ZrO}_2$ ,  $\text{CeO}_2\text{-ZrO}_2$ ) (Chiang et al., 1996). Elektrolit yang sering digunakan sebagai SOFC adalah elektrolit YSZ dan elektrolit CSZ (Van Gestel et al., 2015)(Han et al., 2007). Elektrolit YSZ dan CSZ yang digunakan pada SOFC memiliki stabilitas dan kompatibilitas yang tinggi dengan material elektroda pada berbagai daerah temperatur namun konduktivitas ionik tertinggi (1S/cm) dicapai pada temperatur tinggi (1070-1270 °K) (Kazlauskas et al., 2012). Tingginya temperatur yang digunakan mengakibatkan terjadinya

degradasi pada berbagai komponen dari SOFC dan biaya fabrikasi material yang tinggi. Elektrolit yang diharapkan adalah elektrolit yang memiliki konduktivitas ionik yang tinggi pada daerah temperatur 500 °C- 800 °C (Raghvendra dan Singh, 2015).

Selain dari  $\text{ZrO}_2$ , material yang banyak digunakan adalah  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ .  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  murni mempunyai dua bentuk kristal yang stabil yaitu  $\delta$  phase dengan struktur *fluorite* diatas temperatur 730 °C dan fasa  $\alpha$  monoklinik dibawah temperatur 730 °C (Minh dan Takahashi, 1995).  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  dengan  $\delta$  phase memiliki konduktivitas ionik sekitar 0,1 S/cm pada  $T = 500$  °C. Nilai konduktivitas ioniknya tinggi disebabkan karena  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mempunyai kisi anion kosong sebesar 25%. Kelemahan dari  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  adalah mudah tereduksi menjadi logam Bi dalam pemanasan dengan karbon atau hidrogen dan mudah tereduksi dengan gas karbon monoksida menjadi BiO. Selain dari itu,  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  dengan  $\delta$  phase hanya stabil pada suhu 730-825 °C sehingga daerah temperatur yang dapat digunakan masih rendah. Salah satu cara yang digunakan untuk memperbaiki sifat dari  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  adalah dengan penambahan dopan. Dopan yang telah digunakan pada  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  adalah  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Er}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Gd}_2\text{O}_3$  dan dopan kation divalent (Singhal et al., 2003)(Anderson dan Khandkar, 1997). Penambahan dopan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  menimbulkan permasalahan baru yaitu menyebabkan transformasi menjadi fasa rombohedral yang mudah terdekomposisi pada suhu 700 °C. Dekomposisi inilah yang dihindari pada SOFC (Fergus et al., 2008).

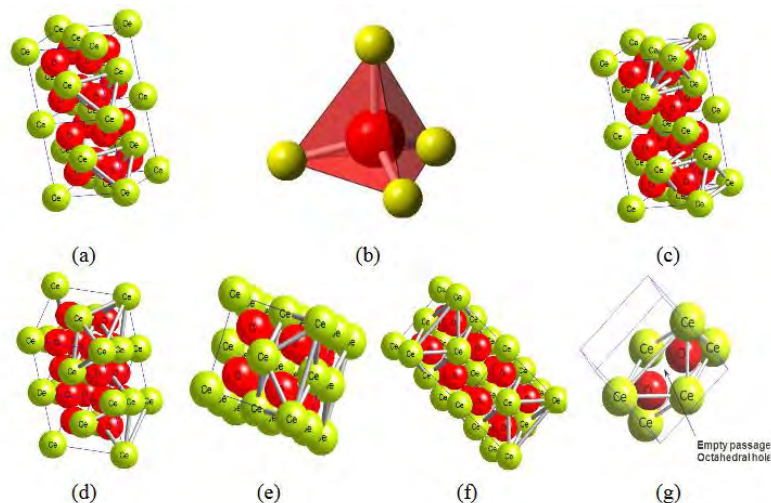
Material yang dapat digunakan selain  $\text{ZrO}_2$  dan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  adalah  $\text{CeO}_2$  (Malecka dan Kępiński, 2012)(Fergus et al., 2008).  $\text{CeO}_2$  atau Cerianite memiliki massa molar 172, 115 g/mol dan memiliki densitas 7,215 g/cm<sup>3</sup>. Struktur yang dimiliki  $\text{CeO}_2$  adalah struktur  $\text{AX}_2$ /Fluorite dengan sistem kristal kubik.  $\text{CeO}_2$  mempunyai space group Fm-3m(225) dengan parameter kisi ( $a=5,4110$  Å).  $\text{CeO}_2$  bersifat stabil sampai titik lelehnya (2.400 °C) dan tidak mengalami transformasi fasa seperti pada  $\text{ZrO}_2$  dan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Struktur kristal dari  $\text{CeO}_2$  dapat dilihat sebagai *face-centered cubic* dengan pusat mukanya adalah atom Ce. Struktur  $\text{CeO}_2$  dapat dipandang juga sebagai *simple cubic* seperti arsiran warna kuning pada Gambar 2.2 dengan pusat dari *simple cubic* adalah Ce yang dikelilingi oleh atom O yang terletak pada masing-masing pojok. Jumlah atom O yang mengelilingi Ce pada *simple cubic* yang diarsir warna kuning berjumlah 8 buah. Jarak antara oksigen dengan oksigen

adalah 2,705 Å , nilai jaraknya adalah  $\frac{1}{2}$  dari parameter kisinya (Rockenhäuser, 2015).



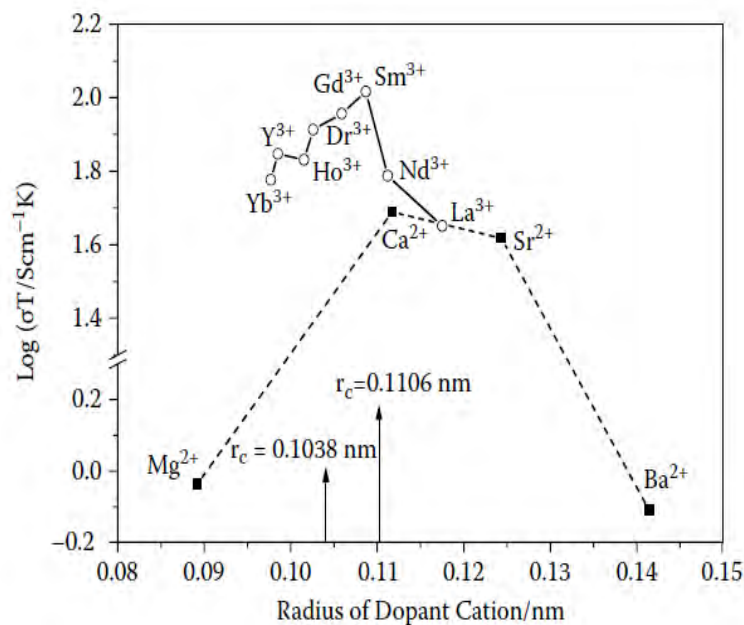
**Gambar 2.2.** Struktur fluorite pada  $\text{CeO}_2$  murni/ $\text{CeO}_2$  tanpa doping (Sumber: <http://www.metafysica.nl/turing/preparation>).

Situs tetrahedral dari struktur  $\text{CeO}_2$  dapatlah dipandang dengan menganggap pusat situsya ditempati oleh oksigen dengan atom Ce yang mengelilinginya seperti pada Gambar 2.3 b. Struktur dari  $\text{CeO}_2$ , dapatlah dipandang juga sebagai situs oktahedral dengan pusat situsya ditempati oleh atom kosong yang dikelilingi oleh 6 atom Ce dan 2 atom O.



**Gambar 2.3.** Ilustrasi (a-b) tetrahedral dan (c-g) oktahedral untuk struktur  $\text{CeO}_2$  (Sumber: <http://www.metafysica.nl/turing/preparation>).

CeO<sub>2</sub> murni bukan merupakan konduktor ion oksigen yang baik. Konduktivitas ion oksigen dari CeO<sub>2</sub> dapat dibuat dengan melakukan doping valensi rendah. Tinggi atau rendahnya konduktivitas tersebut tergantung pada karakteristik jenis dopan yang diberikan serta konsentrasi yang ditambahkan (Fergus et al., 2008). Kevana pada tahun 1963 telah melaporkan bahwa doping *calsia* pada ceria menimbulkan konduksi ionik ekstrinsik. Konduktivitas ionik meningkat dengan penambahan konsentrasi CaO sebesar 7-8 mol% dan menurun kembali pada konsentrasi CaO sebesar 13-14 mol%. Konduktivitas ceria dengan dopant trivalen lebih tinggi jika dibandingkan dengan dopant bivalen (Fergus et al., 2008). Selain dari CaO, dopan yang digunakan untuk CeO<sub>2</sub> adalah Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> dan MgO (Tian et al., 2016) (Stojmenović et al., 2014) (Nigara et al., 2001). Syarat utama yang dapat dilakukan ketika melakukan pendopingan adalah radius ionik antara dopan dan CeO<sub>2</sub> hampir sama (Fergus et al., 2008).



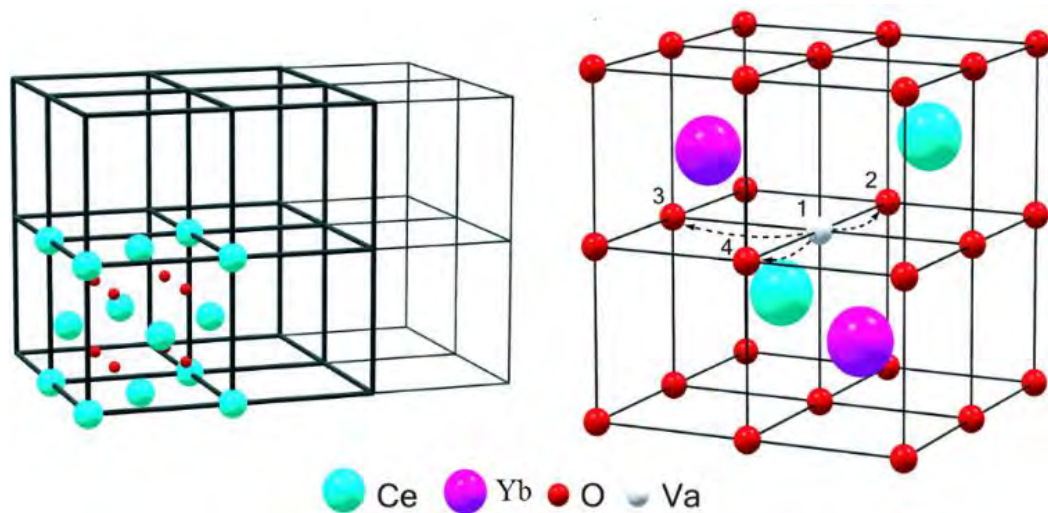
**Gambar 2.4.** Konduktivitas ionik pada Ceria yang didoping alkaline oksida bumi pada temperatur 1073K (Fergus et al., 2008).

Dopan yang bisa digunakan untuk CeO<sub>2</sub> selain Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Sm<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ZrO<sub>2</sub> dan MgO adalah Yb<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (Esther Jeyanthi et al., 2014) (Ye et al., 2007a) (Zhang et al., 2007). Radius ionik untuk bilangan koordinasi 8 untuk ion Ce<sup>4+</sup> adalah 97 pm dan

radius ionik untuk  $\text{Yb}^{3+}$  adalah 98,5 pm (Matović et al., 2014). Berdasarkan Gambar 2.4 log  $\sigma T$  untuk  $\text{Yb}^{3+}$  pada  $T=1073\text{K}$  adalah  $1,7 \text{ Scm}^{-1}\text{K}$ .  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  memiliki sistem kristal kubik dengan space group  $I 213$  (199), parameter kisi  $a = 10,3900\text{\AA}$ , tipe penyusun struktur  $\text{A}_2\text{X}_3$ . Massa molar dari  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  adalah 394,08 gram/mol dengan densitas yang relatif tinggi dibandingkan dengan  $\text{CeO}_2$  yaitu  $9,17 \text{ g/cm}^3$ . Reaksi *defect* yang terjadi ketika dopan  $\text{Yb}^{3+}$  diberikan pada  $\text{CeO}_2$  adalah sebagai berikut:



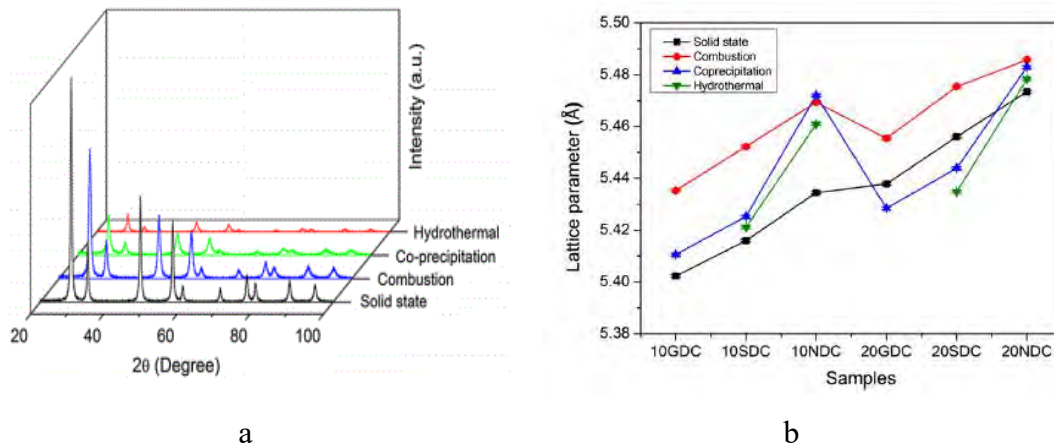
Struktur Fluorite dengan dopan  $\text{Yb}^{3+}$  akan menjadi seperti pada Gambar 2.5.



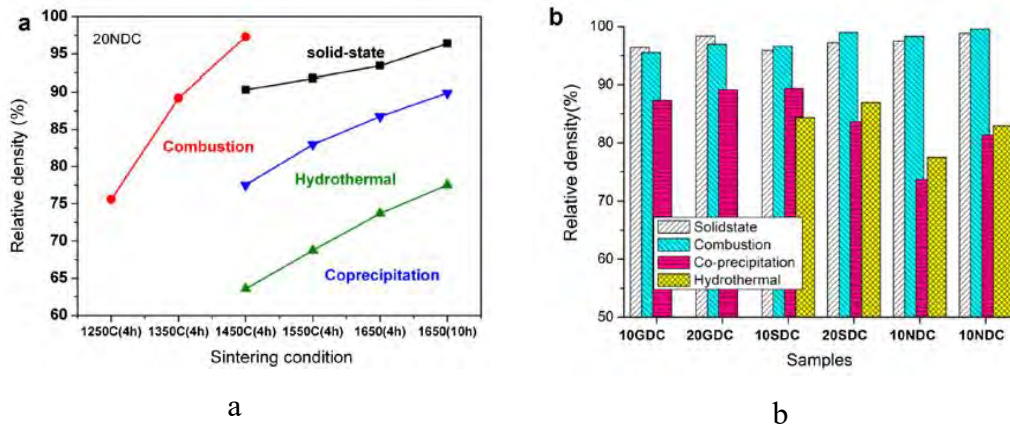
**Gambar 2.5.** Struktur Ceria yang didoping dopan Yb (Andersson et al., 2006).

## 2.2 Metode Preparasi Elektrolit

Metode preparasi yang bisa digunakan untuk pendopingan Ce adalah metode kopresipitasi, pembakaran, hidrotermal dan reaksi padat (Tian et al., 2016) (Stojmenović et al., 2014)(Małacka dan Kępiński, 2012). Perbandingan metode beberapa sintesis dengan aliovalent yang digunakan untuk mendoping Ce telah dilaporkan oleh Kim et al (2013). Hasil yang diperoleh Kim et al (2013) disajikan pada Gambar 2.6 dan 2.7.



**Gambar 2.6.** Pola XRD pada aliovalen yang mendoping ceria untuk berbagai metode sintesis pada bahan Nd *doped* Ce (Kim et al., 2013).



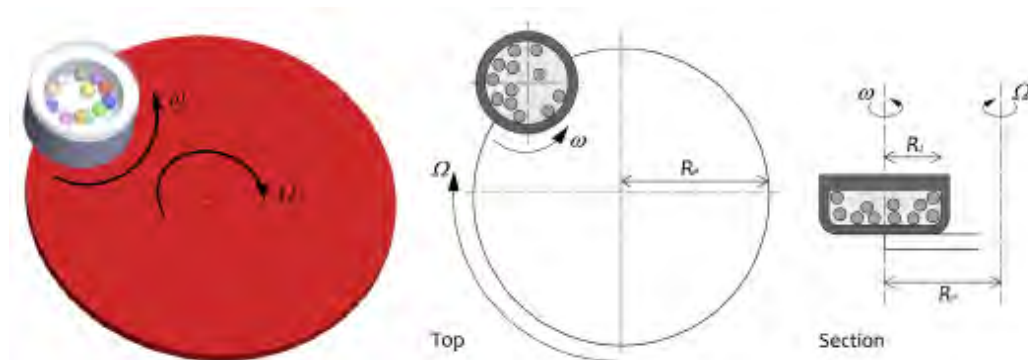
**Gambar 2.7.** a. Nilai densitas relatif sampel 20 NDC dengan berbagai metode preparasi b. Nilai densitas relatif untuk berbagai variasi sampel (Kim et al., 2013).

Pendopingan Yb terhadap Ce telah dilakukan oleh Matović et al (2014) dan Ye et al (2007). Matović et al (2014) melakukan pendopingan Yb terhadap Ce dengan menggunakan sintesis *self-propagating room temperatur*. Hasil yang diperoleh dari pendopingan tersebut adalah mulai terpisahnya  $R_{\text{bulk}}$  dan  $R_{\text{gb}}$  pada temperatur 550-800 °C. Energi aktivasi untuk grain adalah 1,03 eV sedangkan energi aktivasi untuk grain boundary 1,14 eV. Plot Arrhenius untuk konduktivitas  $\text{Yb}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  dapat dilihat pada Gambar 2.5. Ye et al (2007) melakukan pendopingan Yb terhadap Ce menggunakan *metode ammonium carbonate coprecipitation* dengan variasi konsentrasi Yb yang diberikan adalah 0,10 mol, 0,15 mol dan 0,20 mol. Penelitian lebih lanjut dilakukan oleh Fu et al (2008) dengan menggunakan metode



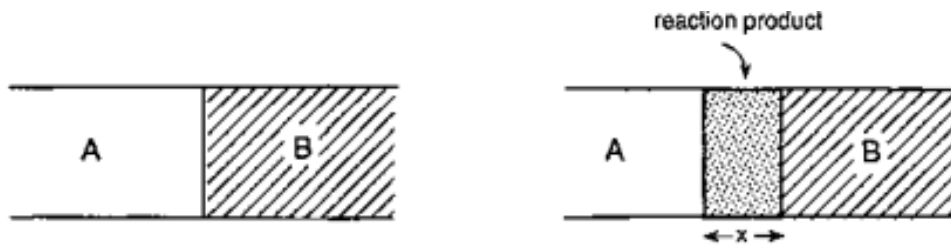
kopresitipasi. Hasil penelitian yang dilakukan Fu et al (2008) adalah densitas sampel  $\text{Ce}_{0,8}(\text{Gd}_{1-x}\text{Bi}_x)_{0,2}\text{O}_{1,9}$  dapat meningkat dengan penambahan *co-fired*  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Densitas yang diperoleh lebih dari 95% dengan konduktivitas yang dihasilkan pada suhu  $800\text{ }^\circ\text{C}$  adalah  $0,078\text{ S/cm}$  dan energi aktivasi yang diperoleh sebesar  $0,638\text{ eV}$ .

Selain dari metode *ammonium carbonate coprecipitation*, *self-propagating room temperatur* dan metode kopresitipasi, metode reaksi padat dapat digunakan (Nigara et al., 2001). Metode reaksi padat cenderung memiliki nilai densitas yang relatif tinggi jika dibandingkan dengan metode sintesis hidrotermal dan kopresitipasi (Gambar 2.7). Metode reaksi padat dapat dilakukan dengan mencampurkan serbuk padatan dengan perbandingan komposisi yang telah ditentukan. Serbuk padatan dicampurkan dengan alkohol sebagai pelarut dan dimiling dalam kecepatan dan waktu tertentu.



**Gambar 2.8.** Representasi skematik pada planetary ball mill (Broseghini et al., 2016).

Bola-bola zirkonia yang terdapat pada jar digunakan untuk mencampurkan dan mereduksi ukuran partikel dari masing-masing serbuk. Bola-bola zirkonia memiliki densitas yang relatif tinggi ( $5,5\text{ Mg/m}^3$ ) pada bahan keramik dan memiliki kekekrasan yang tinggi sehingga digunakan dalam media pencampuran serbuk (Carter dan Norton, 2013). Didalam reaksi padat, dianggap atom-atom yang akan bereaksi dari reaktan dengan susunan tertentu meleburkan diri kemudian bergerak menuju *interface* untuk bereaksi membentuk susunan baru (Suasmoro, 2000).



**Gambar 2.9.** Skema metode reaksi padat yang membentuk susunan baru (Rahaman, 2003).

Asumsi yang digunakan untuk menjelaskan reaksi padat adalah dengan menganggap kondisi selama terjadinya reaksi adalah isothermal dan serbuk yang digunakan memiliki ukuran dan distribusi yang sama untuk serbuk A ketika bereaksi serbuk B. Bentuk produk yang dihasilkan adalah koheren dan seragam pada partikel A. Volume dari material ketika tidak bereaksi pada  $t$  tertentu adalah

$$V = \frac{4}{3}\pi (r-y)^3 \quad (2.9)$$

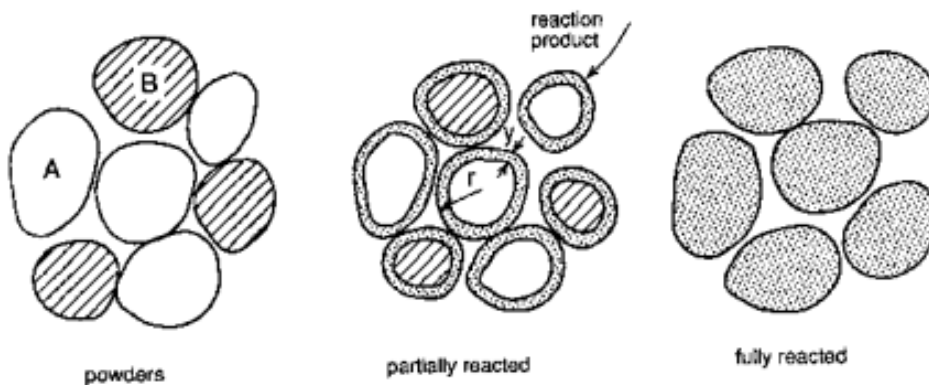
Dimana  $r$  adalah radius awal dari partikel A dan  $y$  merupakan tebal lapisan reaksi. Persamaan lain yang dapat juga menyatakan material belum bereaksi adalah

$$V = \frac{4}{3}\pi r^3 (1-\alpha) \quad (2.10)$$

Dimana  $\alpha$  adalah fraksi volume ketika telah terjadi reaksi. Kombinasi dari dua persamaan diatas dapat ditulis menjadi

$$y = r [1-(1-\alpha)]^{\frac{1}{3}} \quad (2.11)$$

Skematik dari reaksi padat terdapat pada Gambar 2.10.



**Gambar 2.10.** Skema proses pencampuran serbuk dengan reaksi padat (Rahaman, 2003).

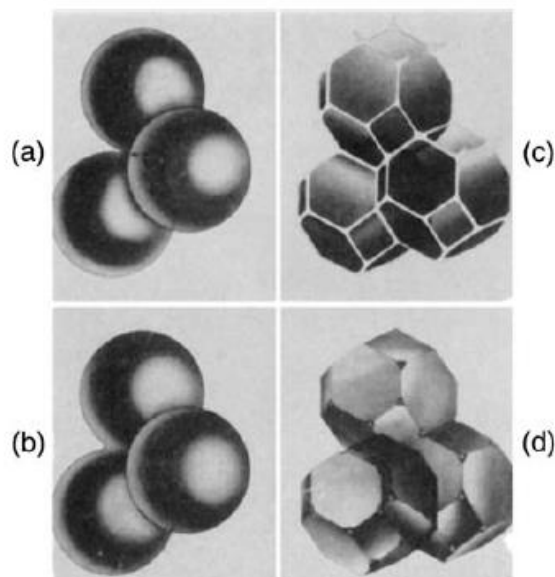
Pencampuran dengan menggunakan reaksi padat bergantung pada beberapa parameter yaitu ukuran, distribusi ukuran, bentuk serbuk, temperatur dan waktu reaksi. Ketika ukuran serbuk yang dicampurkan besar maka laju reaksi pencampuran akan lambat, hal ini dikarenakan jarak antar partikel untuk bereaksi besar. Laju reaksi akan semakin meningkat ketika temperatur yang diberikan semakin tinggi. Pencampuran bahan relatif akan semakin merata ketika distribusi ukuran serbuk yang dicampurkan memiliki distribusi yang homogen. Setelah serbuk campuran diperoleh, tahapan pendopongan selanjutnya adalah proses pemanasan dan sinter (Rahaman, 2003).

### 2.3 Sinter

Sinter merupakan suatu proses pemanasan pada temperatur tinggi (1500-1700 °C) yang secara global menurunkan energi bebas disertai perubahan dimensi. Dalam proses ini terjadi kenaikan kohesi antar partikel-partikel penyusun benda dan pemadatan melalui proses eliminasi porositas. Selama proses diperlukan energi agar sistem dapat berubah, terjadi perubahan ukuran butir, dan dapat menghilangkan keadaan tak seimbang temporer (Suasmoro, 2000).

Faktor faktor yang mempengaruhi proses pemadatan bahan keramik (sinter) yaitu temperatur, *green density*, ketidakseragaman mikrostruktur dari grain, atmosfer, impuritas, distribusi ukuran dan ukuran partikel. Temperatur berhubungan langsung dengan sintering, peningkatan temperatur akan meningkatkan laju kinetik dari sintering. *Green density* yang besar memungkinkan terjadinya eliminasi porositas yang kecil pada tahap akhir. Keseragaman mikrostruktur sangat berpengaruh pada sintering terutama jika bahan mengalami aglomerasi sehingga sulit untuk terjadinya eliminasi porositas. Atmosfer berhubungan dengan kehadiran gas yang dapat menyebabkan pengasaran oleh peningkatan tekanan gas dan dapat meningkatkan rata-rata difusi selama sintering. Impuritas adalah bahan yang ditambahkan kedalam bahan utama misalnya fasa *liquid* untuk menurunkan suhu sinter. Distribusi ukuran yang sempit akan menurunkan kecenderungan pertumbuhan butir yang abnormal. Ukuran partikel berhubungan dengan *driving force*, semakin besar luas permukaan partikelnya maka gaya pendorong semakin besar (Barsoum dan Barsoum, 2002).

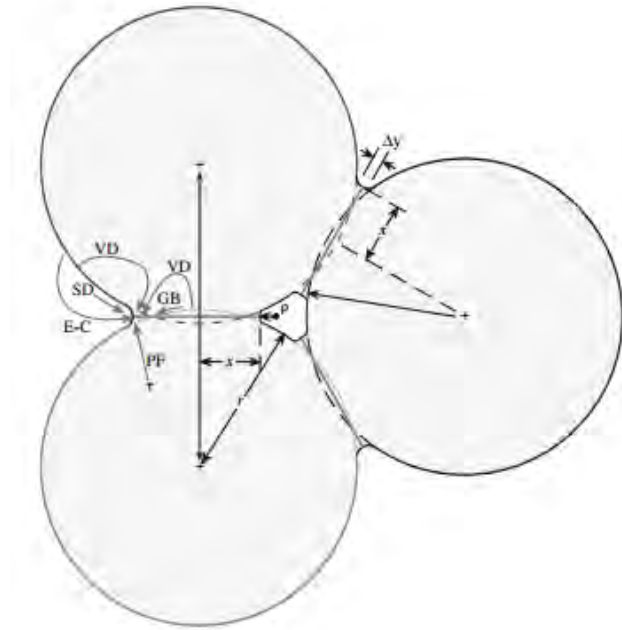
Terdapat tiga tahapan dalam sintering secara umum yaitu tahap awal, tahap intermedier dan tahap akhir (Gambar 2.11). Pada tahapan awal terjadi pertumbuhan kaitan antar butir yang cukup cepat antar partikel oleh mekanisme difusi, transport gas atau aliran *viscous* sehingga perbedaan kelengkungan permukaan akan hilang. Perbedaan kelengkungan yang hilang menyebabkan terjadinya peningkatan jumlah kontak antar partikel. Setelah tahap pertama dilanjutkan ke tahapan *intermedier*. Proses yang terjadi adalah terjadinya pertumbuhan kaitan antar butir dan mulai terjadinya eliminasi porositasnya akibat gerakan mendekat partikel-partikel. Pada tahapan ini mulai terjadi pertumbuhan butir. Tahap yang ketiga adalah tahap akhir. Dalam tahapan akhir, terjadi eliminasi porositas melalui difusi batas antar butir dan pertumbuhan butir (Rahaman, 2003).



**Gambar 2.11.** 6 Mekanisme yang berbeda selama proses densifikasi (Carter dan Norton, 2013).

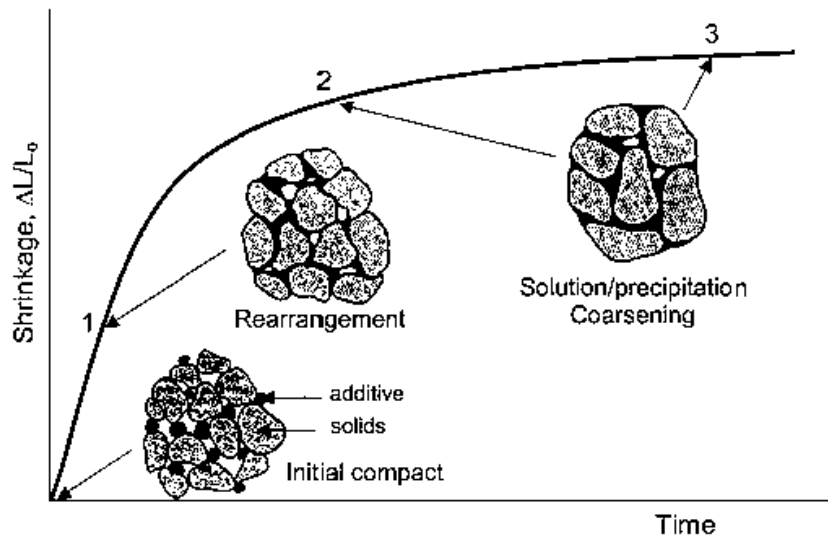
Sintering dapat dilakukan melalui 3 cara yaitu sintering fasa padat, sintering dengan fasa cair dan sintering dengan penekanan. Model yang diajukan untuk menjelaskan sintering fasa padat adalah sebagai berikut. Model pertama adalah model yang berdasarkan pada pertumbuhan kaitan antar butir tanpa adanya

perubahan jarak antar pusat butir dan model yang kedua adalah mempertimbangkan reorganiasi butir disamping pertumbuhan kaitan antar butir (Suasmoro, 2000).



**Gambar 2.12.** 6 Mekanisme yang berbeda selama proses densifikasi (Carter dan Norton, 2013).

Sintering fasa padat secara umum terdiri dari 3 tahapan yaitu *densification*, pertumbuhan butir dan pengasaran. Adapun mekanisme selama sintering dapat dijelaskan melalui 6 mekanisme (Gambar 2.12) yaitu difusi permukaan (SD), perpindahan gas (EC), difusi batas butir (GB), difusi kisi dari permukaan (VD), difusi kisi dari batas butir (VD) dan *plastic flow* (PF). Difusi permukaan, difusi kisi dan transport gas mengakibatkan pertumbuhan leher butir namun mekanisme yang terjadi tidak menyebabkan densifikasi butir. Sehingga 3 jenis difusi ini dikenal dengan mekanisme *nondensifying*. Mekanisme *nondensifying* tidak bisa diabaikan karena dapat mereduksi lengkungan permukaan leher butir. Mekanisme ini digolongkan sebagai *driving force sintering* sehingga memudahkan terjadinya mekanisme densifikasi. Difusi batas butir dan difusi kisi dari batas butir ke porositas merupakan mekanisme yang paling penting dalam keramik. Difusi batas butir mengakibatkan terjadinya pertumbuhan leher butir dan juga terjadi densifikasi butir. Sedangkan *plastic flow* diakibatkan oleh adanya gerakan dislokasi dan hanya terjadi pada serbuk metal (Rahaman, 2003).



**Gambar 2.13.** Tahapan tahapan yang terjadi pada sintering fasa cair (Rahaman, 2003).

Sintering fasa cair adalah jenis sintering yang mengandung fasa cair. Fasa cair yang ditambahkan memiliki titik leleh yang lebih rendah dari serbuk utama. Sintering fasa cair secara umum memiliki 3 mekanisme yaitu penyusunan kembali (*rearrangement*), pelarutan dan pengendapan serta penggabungan butir (Gambar 2.13). Pada tahapan pertama terjadi penyusunan posisi antar partikel dibawah pengaruh gaya kapiler dan pengisian poros oleh fasa *liquid*. Jika cairan membasahi dan mengisi semua poros diantara partikel maka densifikasi akan mencapai 100%. Namun proses yang terjadi pada tahapan ini sangat singkat sehingga memungkinkan proses pembasahan dan pengisian fasa cair ke dalam pori-pori diantara partikel belum menacapai 100%. Tahapan yang kedua adalah pelarutan dan pengendapan. Pada tahapan kedua, ketika partikel saling bersentuhan, gaya kapiler yang dihasilkan akan meningkatkan potensial kimia pada daerah yang tidak bersentuhan (Barsoum dan Barsoum, 2002). Selama proses pelarutan dan pengendapan butir-butir berukuran kecil larut dalam kedalam fasa cair, bermigrasi melalui fasa cair dan kemudian mengendap dipermukaan butir besar (Suasmoro, 2000). Tahap yang ketiga adalah tahap akhir. Tahap akhir pada sintering fasa cair adalah penggabungan butir. Penggabungan butir dapat menyebabkan butir-butir

kecil menghilang dan tumbuhnya butir yang besar sehingga bersifat abnormal terhadap grain yang lain (Rahaman, 2003).

## 2.4 Konduktivitas elektrolit

Konduktivitas pada SOFC terdiri dari dua konduktivitas yaitu konduktivitas elektronik dan konduktivitas ionik. Konduktivitas elektronik merupakan konduktivitas yang berperan penting di dalam anoda dan katoda sedangkan konduktivitas dari ionik diabaikan, karena nilainya lebih kecil dari total keseluruhan sedangkan pada elektrolit, konduktivitas ionik merupakan konduktivitas utama pembawa muatan dengan nilai konduktivitas elektronik yang diabaikan (Minh dan Takahashi, 1995). Berikut akan dijelaskan mengenai konduktivitas elektronik dan ionik pada elektrolit.

Konduktivitas elektronik merupakan konduktivitas dengan pembawa muatannya adalah elektron bebas (Barsoum dan Barsoum, 2002). Besarnya nilai konduktivitas elektronik tergantung pada pembawa muatan dan mobilitas dari elektron. Berikut persamaan nilai konduktivitas elektronik

$$\sigma = nq\mu \quad (2.12)$$

dengan  $n$  menyatakan jumlah pembawa muatan,  $q$  muatan elektron ( $1,9 \times 10^{-16}$  C) dan  $\mu$  menyatakan mobilitas elektron.

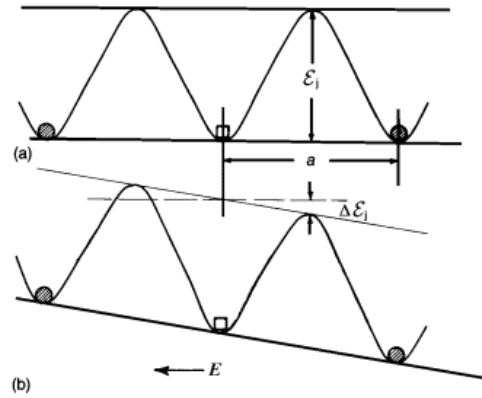
Konduktivitas ionik bergantung pada kehadiran vakansi yang mana ion dapat bergerak. Kehadiran medan listrik dan vibrasi thermal yang sebanding dengan  $KT$  menyebabkan ion dan vakansi akan berpindah tempat. Persamaan Nernst-Einstein dapat menjelaskan terjadinya proses pergerakan dan difusi dari ion yang disebabkan oleh medan listrik pada  $T$  tertentu.

$$\sigma_i = \frac{Q_i N_i}{kT} D_i \quad (2.13)$$

Dimana  $D_i$  adalah koefisien difusi,  $Q_i$  adalah muatan pembawa dan  $N_i$  adalah konsentrasi

Kehadiran vakansi didalam struktur kristal memungkinkan ion dapat berpindah dari satu vakansi ke vakansi yang lain, dimana arahnya berlawanan

dengan arah pergerakan ion. Pengaruh medan listrik pada vakansi dan ion dapat dijelaskan sebagai berikut. Ketika medan listrik tidak diberikan, maka perpindahan vakansi akan bergerak secara acak dan hanya bergantung pada temperatur (Moulson dan Herbert, 2003).



**Gambar 2.14.** Perpindahan ion pada kristal a. Tanpa adanya medan b. Terdapat medan (Moulson dan Herbert, 2003).

Gambar 2.14 menunjukkan representasi satu dimensi dari perpindahan ion/vakansi ketika tidak diberi medan listrik dan ketika diberi medan listrik. Ketika tidak diberi medan listrik probabilitas vakansi untuk bergerak ke kiri atau ke kanan adalah sama karena memiliki  $\epsilon_j$  yang sama namun ketika diberi medan listrik tinggi *barier* menjadi berbeda. Probabilitas untuk melompat tertinggi berada pada daerah yang memiliki energi *barier* yang rendah (sebelah kanan). Perubahan energi *barier* ini dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\Delta \epsilon_j = eE \frac{a}{2} \quad (2.14)$$

Kerapatan arus ketika medan listrik diberikan dapat dituliskan persamaannya sebagai berikut:

$$\mathbf{j} = \frac{n_v A}{n T} \mathbf{E} \exp \left( -\frac{\epsilon_j}{kT} \right) \quad (2.15)$$

$$\mathbf{j} = \frac{A}{T} \mathbf{E} \exp \left( \frac{-\Delta H_s}{2kT} \right) \exp \left( -\frac{\epsilon_j}{kT} \right) \quad (2.16)$$

$$\sigma_i = \frac{A}{T} \exp \left[ \left( -\frac{1}{kT} \right) \left( \epsilon_j + \frac{\Delta H_s}{2} \right) \right] \quad (2.17)$$

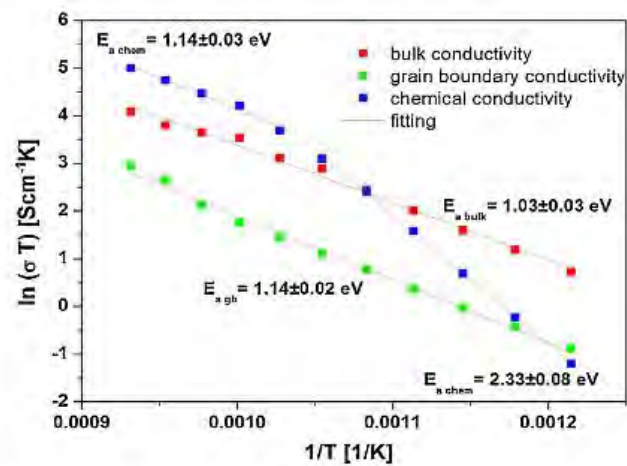
bagian persamaan diatas dapat disederhanakan menjadi persamaan



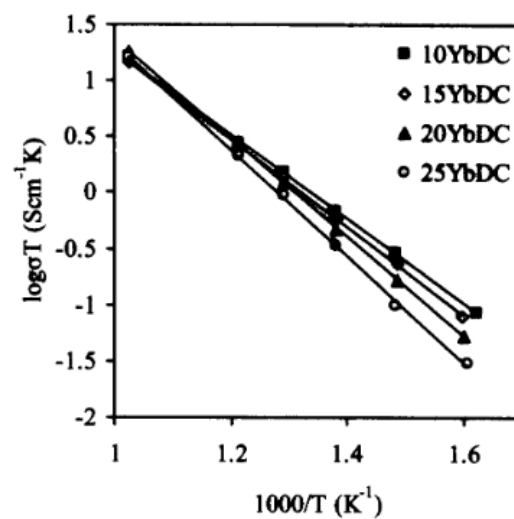
$$\sigma_i = \sigma_o \exp \left( -\frac{\varepsilon_i}{kT} \right) \quad (2.18)$$

dengan  $\left[ \left( -\frac{1}{kT} \right) \left( \varepsilon_j + \frac{\Delta H_s}{2} \right) \right]$  menyatakan energi aktivasi yang dimiliki oleh bahan keramik (Moulson dan Herbert, 2003).

Hubungan antara  $\sigma_i$  dengan temperatur dapat disajikan dalam sebuah kurva. Kurva yang dimaksud adalah plot Arrhenius  $\ln(\sigma T)$  terhadap  $1/T$ . Berikut disajikan pada Gambar 2.15-2.16. Plot  $\ln(\sigma T)$  terhadap  $1/T$  diperoleh dari penelitian yang dilakukan oleh Matović et al (2014) dan Ye et al (2007).



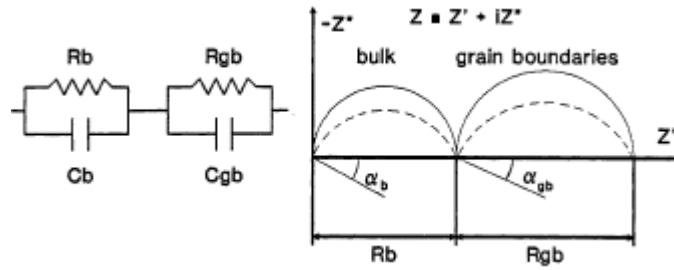
**Gambar 2.15.** Hubungan antara  $1/T$  dengan  $\ln(\sigma T)$  pada konduktivitas butir, konduktivitas batas butir dan elektroda (Matović et al., 2014).



**Gambar 2.16.** Hubungan antara  $1/T$  dengan  $\ln(\sigma T)$  terhadap variasi komposisi YbDC (Ye et al., 2007).

## 2.5 Model Rangkaian Listrik

Karakteristik dari sifat listrik dapat diketahui melalui hubungan antara impedansi real dengan impedansi imajiner. Hubungan impedansi dari suatu rangkaian listrik dapat disajikan pada Gambar 2.17.



**Gambar 2.17.** Plot hubungan antara impedansi real ( $Z'$ ) dengan impedansi imajiner ( $-Z''$ ) (Abelard dan Baumard, 2009).

Jika dianggap memiliki rangkaian paralel, persamaan impedansi kompleks ( $Z^*$ ) setiap *semi-circle* ditunjukkan pada persamaan

$$Z^* = \frac{R}{1 + (\omega CR)^2} - jR \frac{\omega CR}{1 + (\omega CR)^2} \quad (2.19)$$

Nilai resistansi dari sampel yang diukur listriknya adalah jumlahan resistansi dari resistansi *bulk* ( $R_b$ ) dan resistansi dari *batas butir* ( $R_{Gb}$ ). Persamaan kompleks impedansi ditunjukkan pada persamaan

$$Z^* = \left[ \frac{R_1}{1 + (\omega C_1 R_1)^2} + \frac{R_2}{1 + (\omega C_2 R_2)^2} \right] - j \left[ \frac{R_1^2 C_1}{1 + (\omega R_1 C_1)^2} + \frac{R_2^2 C_2}{1 + (\omega R_2 C_2)^2} \right] \quad (2.20)$$

Nilai  $R_1$  menyatakan resistansi dari butir dan  $C_1$  menyatakan kapasitansi dari butir sedangkan  $R_2$  menyatakan resistansi dari batas butir dan  $C_2$  menyatakan kapasitansi dari batas butir (Moulson dan Herbert, 2003).

## BAB III

### METODOLOGI PENELITIAN

#### 3.1 Bahan

Bahan yang digunakan adalah serbuk  $\text{ZrO}_2$  (Sigma D30926), serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (RED Puratrem 93-3925), serbuk  $\text{CeO}_2$  (Sigma 211575), serbuk  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  (Sigma 24699) dan serbuk  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  (Sigma 95381). Komposisi mol yang digunakan adalah 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ , 80 mol %  $\text{CeO}_2$ -20 mol %  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  dan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ -20 mol %  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  dan 80 mol %  $\text{CeO}_2$ .

#### 3.2 Alat

Peralatan yang digunakan pada penelitian ini yaitu spatula, timbangan digital, *laboratory planetary milling* “Pulverisette 5” (Fritsch GmbH), *evaporator rotatif* “VV Micro” (Heidolph), *crucible*, oven (pengering sampel), *furnace carbolite 1400*, *Particle size analysis (PSA)*, *furnace carbolite 1100*, cetakan pelet diameter 13 mm dan Solartron *impedance analyzer 1260* (karakterisasi sifat listrik).

#### 3.3 Prosedur Kerja

Serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dengan massa 1,963 gram dicampurkan dengan serbuk  $\text{ZrO}_2$  dengan massa 12,324 gram. Perbandingan massa ini setara dengan komposisi 92 mol %  $\text{ZrO}_2$  dan 8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$ . Sedangkan untuk komposisi serbuk campuran 20YBDC adalah dengan mencampurkan 20% mol  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  dengan 80 % mol  $\text{CeO}_2$ . Serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dan serbuk  $\text{ZrO}_2$  dimasukkan kedalam mangkuk milling jar dengan media yang digunakan untuk pencampuran adalah etanol. Langkah yang sama dilakukan pada serbuk campuran  $\text{CeO}_2$  dan  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ . Jumlah etanol yang ditambahkan pada campuran sebanyak 35 ml. Bola-bola penumbuk yang digunakan untuk mencampurkan dan menghaluskan serbuk adalah bola-bola zirkonia dengan jumlah 23 buah. Pencampuran bahan  $\text{Y}_2\text{O}_3$ - $\text{ZrO}_2$  dan pencampuran bahan  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ - $\text{CeO}_2$  menggunakan *planetary milling* “Pulverisette 5” (Fritsch GmbH) dengan kecepatan 150 rpm selama 5 jam. Serbuk yang diperoleh dari hasil pencampuran, dimasukkan ke dalam evaporator rotatif selama 5 jam. Kemudian Serbuk yang diperoleh dari hasil penguapan dengan evaporator dikeringkan selama 1 hari pada

temperatur 60 °C. Serbuk campuran  $\text{ZrO}_2\text{-Y}_2\text{O}_3$  (SC) yang diperoleh dari hasil pengeringan kemudian dipress pada tekanan 40 Mpa dengan massa yang digunakan sebanyak 0,8 gram dan disinter pada suhu 1550 °C selama 4 jam. Pelet yang diperoleh dinamakan pelet 8YSZ.

Serbuk campuran  $\text{Yb}_2\text{O}_3\text{-CeO}_2$  hasil pemanasan dikelompokkan menjadi 3 kelompok pengujian. Kelompok pertama adalah serbuk campuran tanpa melalui pemanasan. Kelompok kedua adalah serbuk campuran yang dipanaskan pada temperatur 1100 °C selama 2 jam, 1200 °C selama 2 jam, 1300 °C selama 2 jam, 4 jam, 8 jam dan 16 jam. Kelompok kedua yang mempunyai fasa tunggal, diuji ukuran partikelnya menggunakan *particle size analysis* (PSA). Kelompok ketiga adalah serbuk campuran yang dipanaskan pada temperatur terbentuknya *single phase* kemudian dicampurkan dengan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Serbuk pertama, serbuk kedua yang mempunyai fasa tunggal dan serbuk ketiga ditekan pada tekanan 40 Mpa dengan masing-masing massa yang digunakan sebanyak 0,8 gram. Serbuk pertama dan kedua disinter pada temperatur 1350 °C selama 20 jam sedangkan serbuk ketiga disinter pada temperatur 1100 °C selama 8 jam. Semua kelompok yang telah disinter disebut sebagai pelet. Kelompok 1 disebut pelet TP, kelompok kedua disebut pelet P dan kelompok ketiga disebut pelet P+B. Semua pelet yang diperoleh kemudian dilapisi permukaan atas dan bawah dengan menggunakan pasta perak sebagai elektroda. Pasta yang telah dilapisi dengan merata pada seluruh permukaan kemudian dikeringkan dengan menggunakan lampu bohlam selama 24 jam dan dipanaskan dengan menggunakan *furnace carbolite 1100* pada temperatur 900 °C.

### 3.4 Karakterisasi Sampel

Karakterisasi dan analisis dari masing-masing pengujian dapat dijabarkan sebagai berikut:

1. Pengujian XRD semua serbuk dan pelet TP, P dan pelet 8YSZ dilakukan di Laboratorium Teknik Material ITS menggunakan difraktometer tipe *Philips X'Pert Pro MPD (Multi Purpose Diffractometer)*. Pengukuran dilakukan pada tegangan 30 kV dan arus 40 mA dengan logam target Cu ( $\lambda_1 = 1,540598 \text{ \AA}$  dan  $\lambda_2 = 1,544426 \text{ \AA}$ ) sedangkan sampel yang ketiga dilakukan di Labolatorium

semen Gresik dengan logam target Cu ( $\lambda_1 = 1,540598 \text{ \AA}$ ). Sudut ( $2\theta$ ) yang digunakan untuk semua serbuk dan sampel adalah sudut 20-70.

2. Identifikasi fasa-fasa yang terbentuk dari semua sampel menggunakan program *Match!2* sedangkan perhitungan komposisi fasa dan parameter kisi dilakukan dengan menggunakan metode *Rietveld Refinement* melalui *software Rietica*.
3. Pengukuran densitas relatif dilakukan dengan menggunakan perbandingan antara densitas ukur (densitas Archimedes) dengan densitas hitung. Densitas hitung (*theoretical density*) diperoleh dengan menggunakan perhitungan atom-atom yang menempati struktur kristal *fluorite* sedangkan densitas ukur diperoleh dengan menggunakan metode Archimedes. Formula yang digunakan untuk menghitung densitas ukur ditunjukkan pada Persamaan 3.1

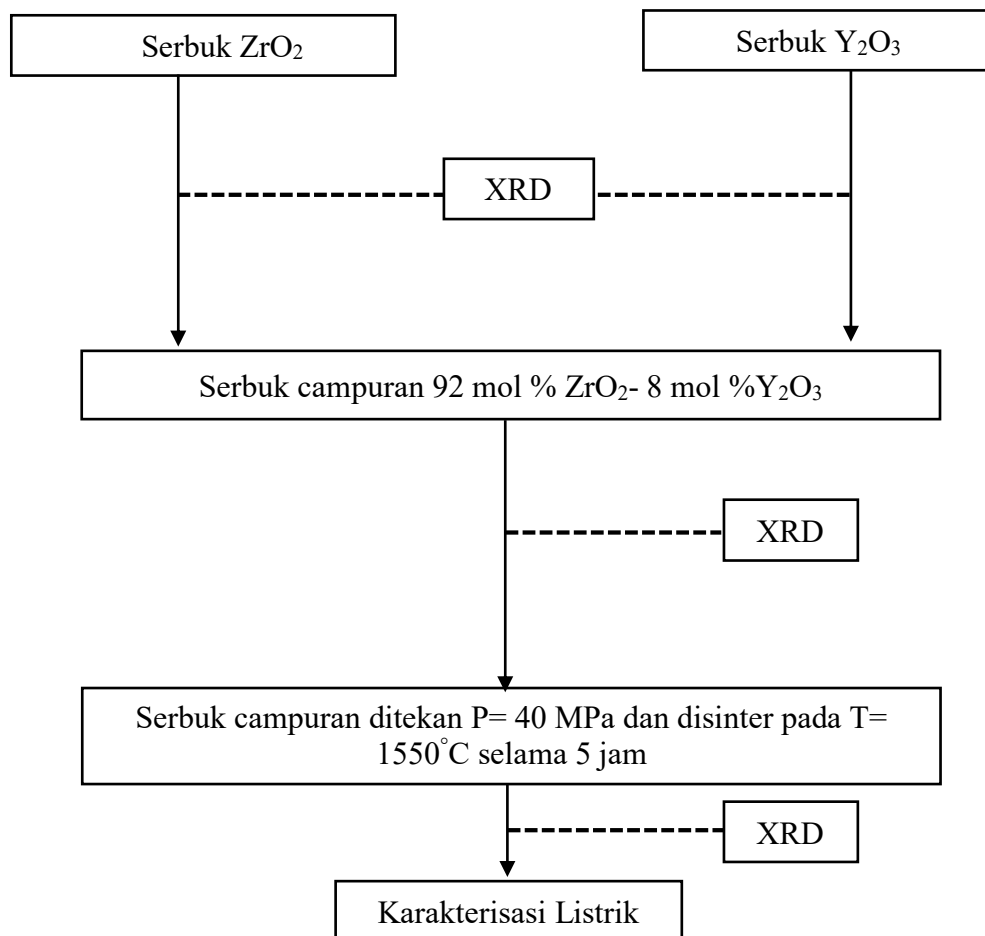
$$\rho = \frac{m_k}{m_b - m_a} \times \rho_a \quad (3.1)$$

$\rho$  = densitas sampel,  $m_k$  adalah massa sampel saat kering (gram),  $m_b$  adalah massa sampel saat basah (gram),  $m_a$  adalah massa sampel saat berada di dalam air (gram) dan  $\rho_a$  adalah massa jenis air (gram/cc).

4. Karakterisasi sifat listrik menggunakan alat *Impedance Analyzer* Solartron 1260. Frekuensi yang digunakan adalah 32 MHZ-0,1 HZ. Pengukuran dilakukan pada temperatur 100-850 °C. Hasil yang diperoleh dari pengukuran sifat listrik adalah nilai impedansi real dan impedansi imajiner. Impedansi real dan impedansi imajiner ini kemudian diplot menggunakan *software Matlab*. Hasil yang diperoleh dengan menggunakan *software Matlab* adalah nilai resistansi untuk grain, grain boundari dan elektroda. Hubungan antara konduktivitas dengan temperatur diperoleh dengan menggunakan plot  $\ln(\sigma T)$  terhadap  $1/T$ .
5. Kajian struktur mikro berupa morfologi dan distribusi butir pada sampel dilakukan dengan *Scanning Microscope Electron* (SEM).

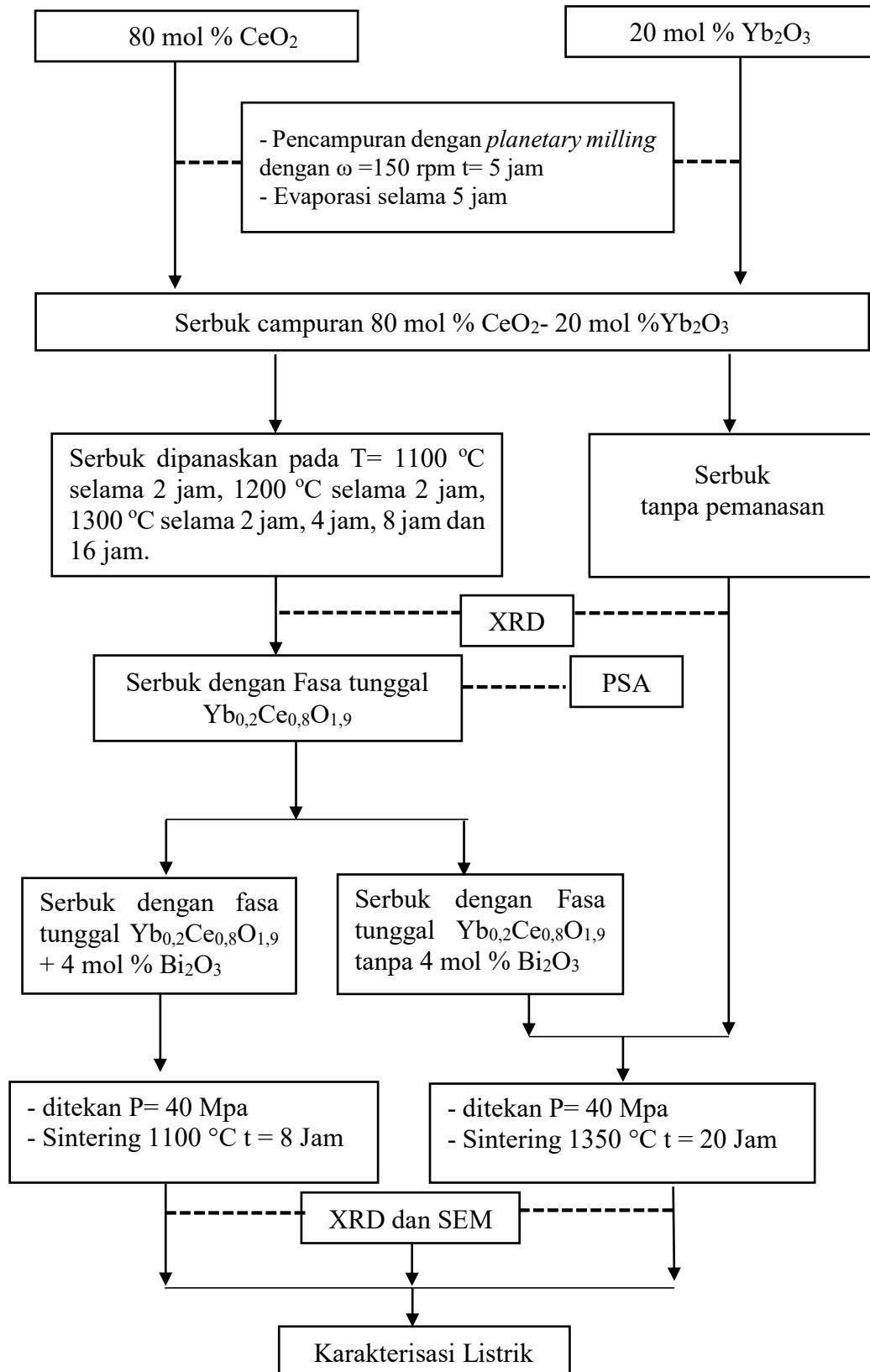
### 3.5 Diagram Alir Penelitian

#### 3.5.1 Diagram alir penelitian 8YSZ



**Gambar 3.1** Diagram Alir penelitian elektrolit 8YSZ dari tahapan pencampuran sampai dengan karakterisasi sifat listrik.

### 3.5.2 Diagram Alir Penelitian 20 YBDC



**Gambar 3.2.** Diagram Alir penelitian bahan 20 YBDC (Ce<sub>0.8</sub>Yb<sub>0.20</sub>O<sub>1.90</sub>).

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**



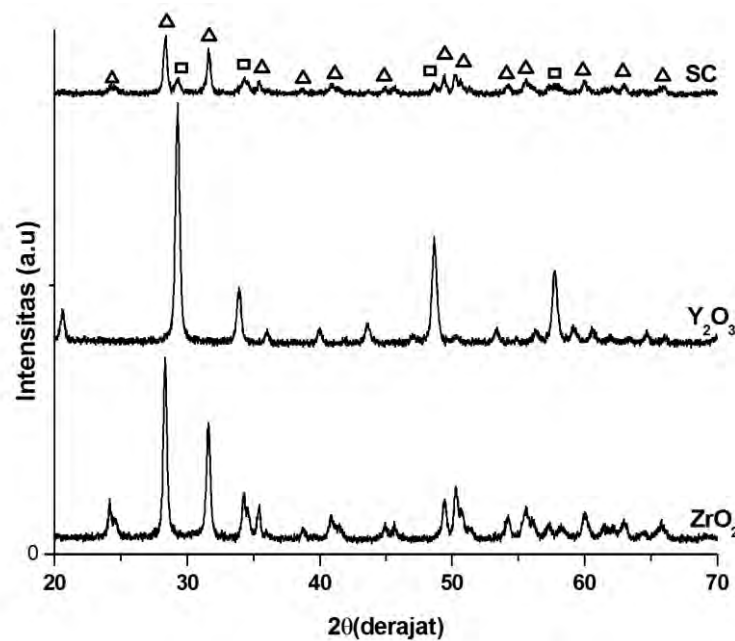
## BAB IV

### HASIL DAN PEMBAHASAN

#### 4.1 Hasil Pencampuran reaksi padat dan Proses Substitusi

##### 4.1.1 Hasil Pencampuran reaksi padat serbuk 8YSZ

Serbuk yang diperoleh dari hasil pencampuran serbuk 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol % serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8YSZ) menggunakan *planetary milling* dengan kecepatan putaran 150 rpm selama 5 jam ditunjukkan pada Gambar 4.1.



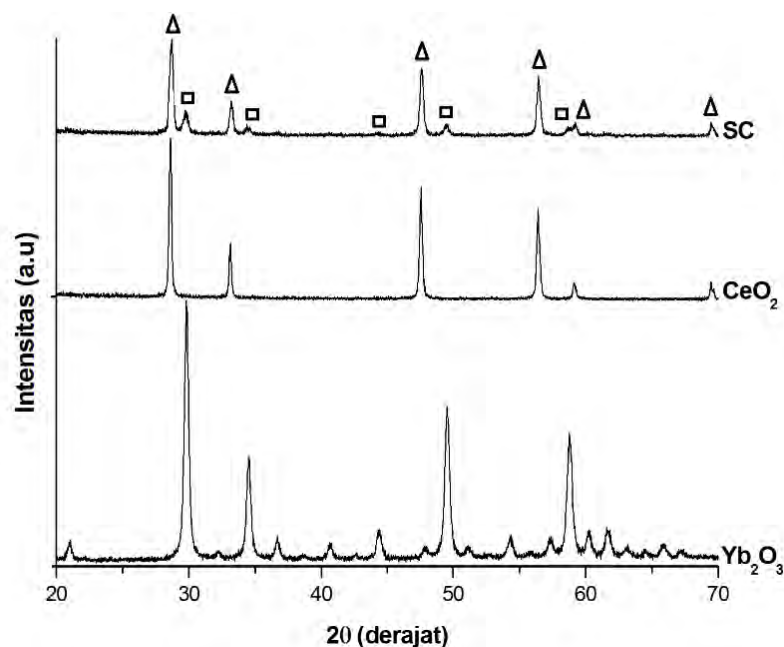
**Gambar 4.1.** Pola-pola difraksi untuk serbuk  $\text{ZrO}_2$ , serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$  dan serbuk campuran (SC) 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8YSZ) ( $\Delta$  =  $\text{ZrO}_2$  monoklinik,  $\square$  =  $\text{Y}_2\text{O}_3$ ).

Fasa teridentifikasi untuk SC dengan menggunakan *software Match!2* adalah  $\text{ZrO}_2$  monoklinik (00-0371484) dan  $\text{Y}_2\text{O}_3$  kubik (00-041-1105). Proses pemanasan serbuk 8YSZ tidak dilakukan pada temperatur  $<1500^\circ\text{C}$  disebabkan karena fasa tunggal kubik dari 8 YSZ dapat terbentuk minimal pada temperatur  $1550^\circ\text{C}$  (Ningsih, 2015). Sebelumnya, proses pemanasan telah dilakukan oleh Budiana dan Suasmoro (2015) dengan menggunakan temperatur  $1200$ - $1350^\circ\text{C}$ , namun fasa yang teridentifikasi belum menunjukkan fasa yang *single phase*. Fasa yang belum *single phase* menunjukkan belum cukupnya energi yang diperoleh

selama pemanasan untuk menggerakkan ion  $Y^{3+}$  untuk mensubstitusi ion  $Zr^{4+}$  dalam struktur monoklinik. Energi pergerakan ini berhubungan langsung dengan peristiwa difusi. Difusi merupakan proses pergerakan ion dari satu kisi ke kisi yang lain. Banyaknya ion yang berdifusi berbanding lurus dengan besarnya temperatur yang diberikan selama proses terjadi. Jika pemanasan dilakukan pada serbuk 8 YSZ dengan temperatur yang mendekati temperatur sinter, butir 8 YSZ akan susah mengalami pertumbuhan (Ningsih, A. 2015) sehingga proses pemanasan tidak dilakukan.

#### 4.1.2 Hasil Pencampuran reaksi padat dan Proses Substitusi 20 YBDC

Serbuk yang diperoleh dari hasil pencampuran serbuk 80 mol %  $CeO_2$  -20 mol % serbuk  $Yb_2O_3$  (20 YBDC) menggunakan *planetary milling* dengan kecepatan putaran 150 rpm selama 5 jam ditunjukkan pada Gambar 4.2



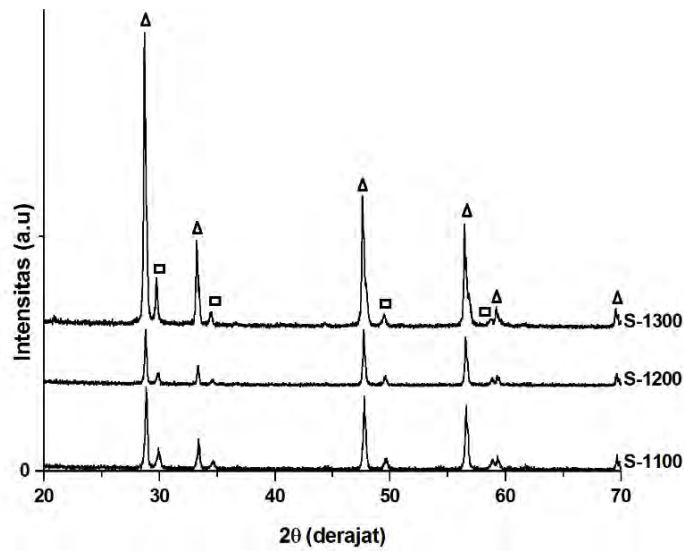
**Gambar 4.2.** Pola-pola difraksi untuk serbuk  $Yb_2O_3$ , serbuk  $CeO_2$  dan serbuk campuran  $CeO_2$  *doped*  $Yb_2O_3$  ( Δ =  $CeO_2$ , ◻ =  $Yb_2O_3$  ).

Reaksi yang terjadi selama proses pencampuran padat adalah reaksi tumbukan antara serbuk dengan serbuk, serbuk dengan bola-bola zirkon dan bola-bola zirkon dengan bola-bola zirkon. Tumbukan ini terus terjadi dengan frekuensi

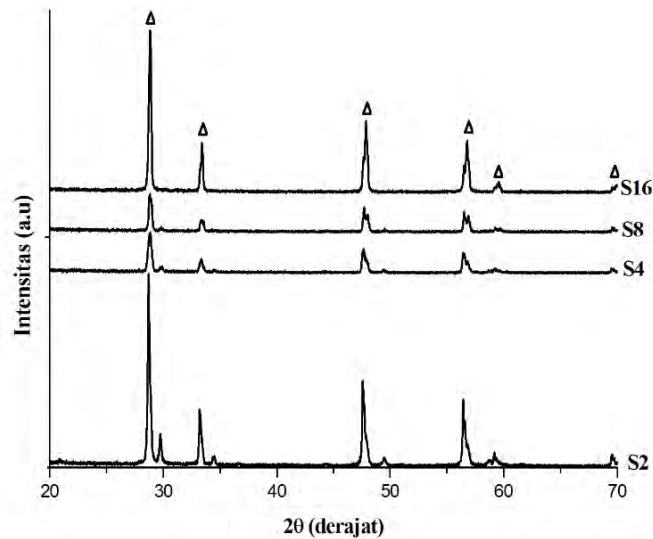
yang cukup tinggi (150 rpm) serta waktu yang relatif lama (5 jam) jika dibandingkan dengan menggunakan mortar biasa. Besarnya energi tumbukan yang terjadi selama proses pencampuran berbanding lurus dengan kuadrat besarnya kecepatan yang diberikan. Peristiwa tumbukan yang terus menerus mengakibatkan serbuk-serbuk yang dicampurkan akan mengalami reduksi ukuran partikel akibat *impact* yang diberikan. Ukuran partikel yang kecil akan memiliki luas area spesifik yang besar sehingga mudah untuk mengalami interaksi satu sama lain. Dengan luas area spesifik yang besar memudahkan serbuk untuk bercampur dan distribusinya lebih menyebar. Selama terjadi pencampuran, terjadi peristiwa sebagai berikut. Serbuk  $\text{CeO}_2$  dan serbuk  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  mengalami transfer konveksi. Transfer konveksi adalah reaksi transport atom Yb ke *interface* struktur  $\text{CeO}_2$ . Reaksi pada proses pencampuran padat belum mampu untuk memasukkan atom Yb ke dalam struktur  $\text{CeO}_2$  dan menggantikan posisi atom Ce dalam situs yang ditempatinya. Hal ini ditunjukkan dari pola  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  yang masih ada pada serbuk SC (Gambar 4.1).

Proses substitusi atom Yb terhadap Ce pada serbuk campuran dilakukan pada temperatur 1100 °C, 1200 °C dan 1300 °C selama 2 jam. Pemilihan temperatur ini berdasarkan penelitian yang dilakukan oleh Budiana dan Suasmoro (2015). Budiana dan Suasmoro (2015) melaporkan bahwa penurunan konsentrasi dopan pada struktur *fluorite* mulai terjadi pada temperatur 1100 °C selama 2 jam. Tujuan diberikannya variasi temperatur adalah untuk mengetahui pengaruh temperatur tertentu terhadap penurunan fasa kubik  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ . Proses substitusi juga dilakukan dengan variasi waktu tahan. Waktu tahan yang dilakukan memiliki pola  $2^n$  ( $n=1, 2, 3, 4$ ). Temperatur yang digunakan untuk variasi waktu tahan adalah 1300 °C. Pemilihan temperatur 1300 °C dikarenakan pola difraksi dari S-1300 terlihat memiliki derajat kristalinitas yang tinggi.

Penamaan sampel pada proses substitusi bisa disederhanakan menjadi sebagai berikut. Sebagai contoh, serbuk yang dipanaskan pada temperatur 1100 °C ditulis S-1000. Sedangkan serbuk yang dipanaskan pada temperatur 1300 °C yang ditahan selama 2 jam ditulis S2. Pola Penulisan juga sama untuk semua serbuk yang divariasikan. Pola-pola difraksi dari semua serbuk pemanasan ditunjukkan pada Gambar 4.3 dan 4.4.



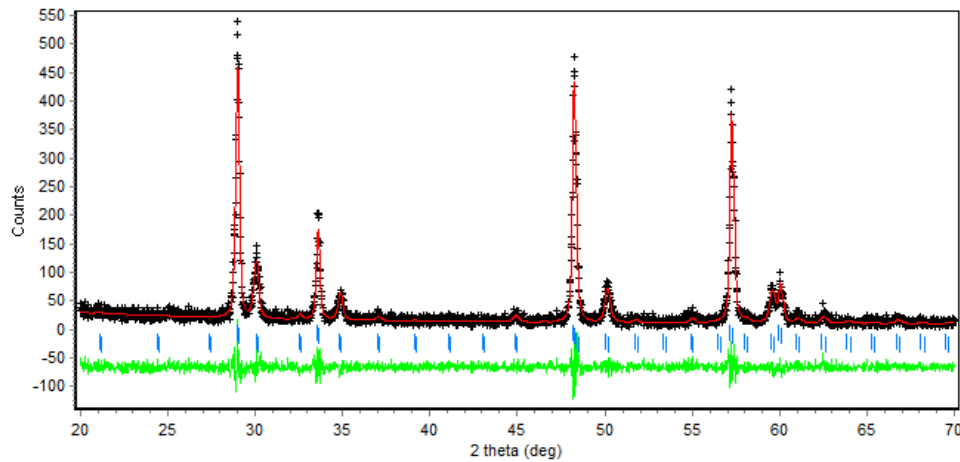
**Gambar 4.3.** Pola difraksi untuk serbuk  $\text{CeO}_2$  *doped*  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  variasi temperatur dengan waktu tahan 2 jam ( $\Delta = \text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$ ,  $\square = \text{Yb}_2\text{O}_3$ ).



**Gambar 4.4.** Pola-pola difraksi untuk serbuk  $\text{CeO}_2$  *doped*  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  variasi waktu tahan dengan  $T=1300\text{ }^\circ\text{C}$  (keterangan simbol:  $\Delta = \text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$ ).

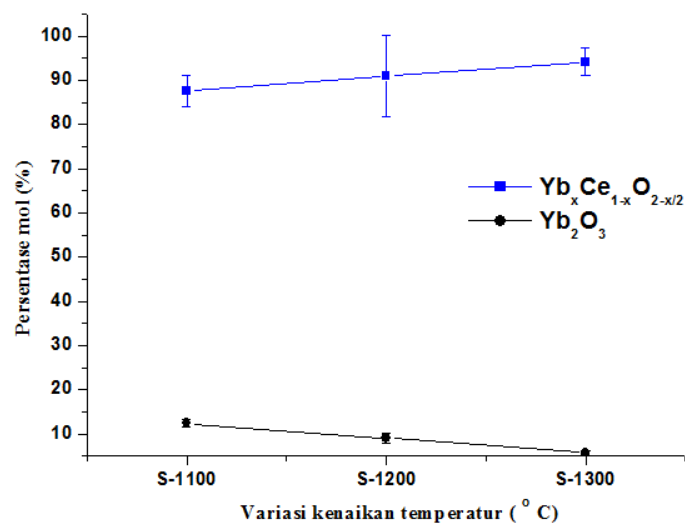
Berdasarkan Gambar 4.3 dan 4.4 semakin tingginya temperatur dan semakin lamanya waktu tahan mengakibatkan derajat kristalinitas dari  $\text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$  semakin meningkat dan derajat kristalinitas dari  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  semakin menurun. Hal ini mengindikasikan terjadinya perubahan komposisi fasa dari fasa  $\text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$  dan fasa  $\text{Yb}_2\text{O}_3$ . Pola-pola difraksi semua serbuk dianalisis secara kuantitatif dengan

metode Rietveld *refinement*. *Software* yang digunakan adalah *Rietica*. Contoh hasil analisa menggunakan *software Rietica* ditampilkan pada Gambar 4.5.



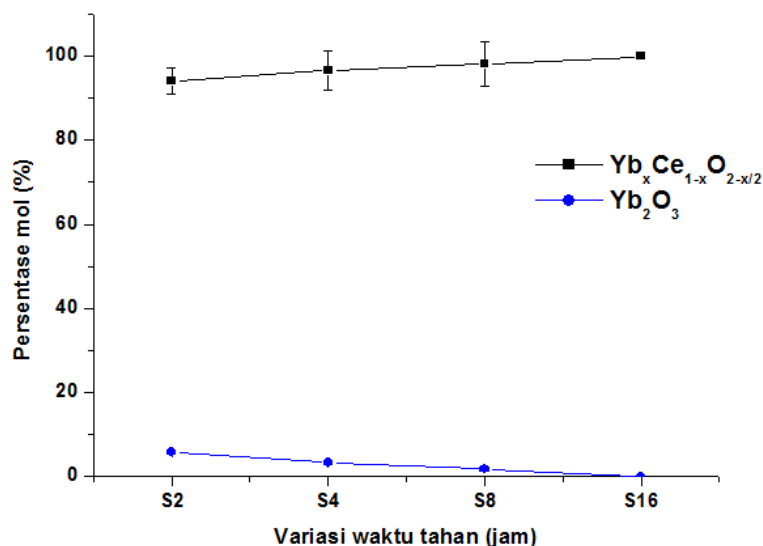
**Gambar 4.5.** Contoh pola hasil penghalusan serbuk S-1100 dengan menggunakan metode Rietveld.

Secara umum, nilai GoF <4 % untuk semua serbuk variasi temperatur dan waktu tahan sehingga data hasil pengolahan dengan menggunakan *Rietica* dapat dianalisis lebih lanjut. Salah satu data keluaran yang dapat dianalisis adalah persentase mol dari masing-masing variasi. Berikut disajikan hubungan persentase mol untuk masing masing variasi (Gambar 4.6).



**Gambar 4.6.** Nilai persentase mol untuk semua serbuk variasi temperatur dengan waktu tahan selama 2 jam.

Berdasarkan Gambar 4.6 dapat dilihat bahwa persentase mol  $\text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$  semakin meningkat sedangkan persentase  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  semakin menurun dengan adanya kenaikan temperatur. Penurunan persentase berat  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  disebabkan karena ion  $\text{Yb}^{3+}$  meninggalkan struktur  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  membentuk fasa baru di dalam struktur  $\text{CeO}_2$  membentuk fasa  $\text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$ . Pada temperatur 1300 °C selama 2 jam, ion  $\text{Yb}^{3+}$  mulai masuk banyak ke dalam struktur  $\text{CeO}_2$  hal ini ditandai dengan penurunan persentase berat  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  yang tinggi bila dibandingkan dengan temperatur 1100 °C dan 1200 °C. Peristiwa masuknya  $\text{Yb}^{3+}$  kedalam struktur  $\text{CeO}_2$  dinamakan difusi substitusi yang bergantung pada temperatur. Semakin tinggi temperatur yang diberikan, maka laju difusi semakin tinggi sehingga ion  $\text{Yb}^{3+}$  lebih mudah masuk ke dalam struktur  $\text{CeO}_2$ . Selain dari variasi temperatur, difusi substitusi juga ditentukan oleh waktu. Hubungan antara variasi waktu tahan terhadap persentase berat disajikan pada Gambar 4.7.



**Gambar 4.7.** Nilai persentase berat untuk serbuk campuran  $\text{CeO}_2$  yang didoping  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  terhadap variasi waktu tahan.

Fasa *single phase* dari serbuk campuran terbentuk pada temperatur 1300 °C selama 16 jam. Pada temperatur 1300 °C selama 16 jam, ion  $\text{Yb}^{3+}$  telah masuk sempurna ke dalam struktur  $\text{CeO}_2$  membentuk struktur baru  $\text{Yb}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$ . Persamaan reaksi yang terjadi ketika  $\text{Yb}^{3+}$  masuk ke dalam  $\text{Ce}^{4+}$  adalah sebagai berikut:

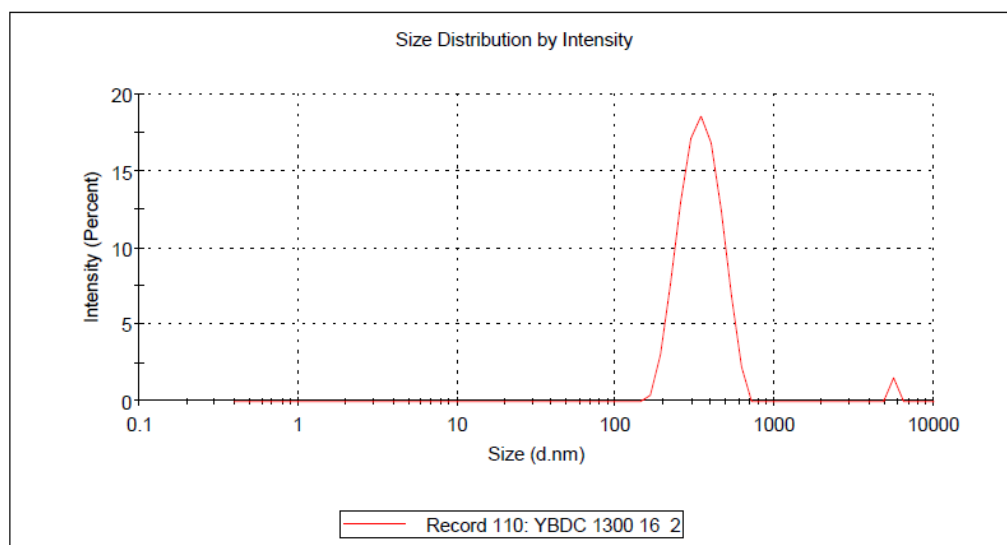


Berdasarkan Persamaan 4.1 kehadiran 2 ion  $\text{Yb}^{3+}$  menggantikan 1 posisi ion  $\text{Ce}^{4+}$  dan untuk menstabilkan muatan dalam struktur *fluorite*, terdapat kehadiran vakansi oksigen. Hal ini sesuai dengan aturan Pauling mengenai netralitas muatan dalam struktur keramik (Chiang et al., 1996).

#### 4.2 Hasil pengujian PSA (*Particle Size Analysis*)

Serbuk yang diuji dengan menggunakan PSA adalah serbuk yang telah memiliki fasa tunggal. Serbuk yang telah memiliki fasa tunggal adalah serbuk campuran  $\text{CeO}_2$  yang didoping 20 mol%  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  yang dipanaskan pada temperatur 1300 °C 16 jam (S16) sedangkan serbuk yang belum *single phase* tidak dilakukan pengujian.

Serbuk S16 yang telah dipanaskan kemudian dimortar selama 15 menit untuk mencegah terjadinya aglomerasi partikel dan dilanjutkan dengan pengujian PSA. Tujuan pengujian PSA adalah untuk mengetahui ukuran partikel dari serbuk yang dimilling selama 5 jam dengan kecepatan 150 rpm yang telah *single phase* dan untuk mengetahui distribusi ukuran partikel. Hasil pengujian ditunjukkan pada Gambar 4.8.



**Gambar 4.8.** Hasil pengujian *Particle size analysis* untuk serbuk S16 (serbuk *single phase*).

Ukuran masing-masing peak dan intensitas masing-masing peak dapat dilihat pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1.** Nilai peak, ukuran dan intensitas untuk masing-masing peak S16

Peak	Size (d. nm)	Intensitas (%)
Peak 1	368,4	96,4
Peak 2	5417	3,6
Rata-rata	426,5	100

Berdasarkan Gambar 4.8 dan Tabel 4.1 terdapat dua peak dengan ukuran dan intensitas yang berbeda. Kehadiran dua peak pada Gambar 4.8 menunjukkan bahwa serbuk S16 masih heterogen dan ukuran rata-rata dari serbuk S16 adalah 426,5 nm atau 0,43  $\mu\text{m}$ . Serbuk yang masih heterogen dan ukuran serbuk yang masih dalam orde nm diduga kuat karena proses pencampuran dengan reaksi padat belum berjalan secara optimal. Optimalisasi ukuran dan homogenisasi serbuk dapat dilakukan dengan menaikkan kecepatan putaran dari *planetary milling* dan memperlama waktu putaran selama pencampuran.

Tujuan dilakukannya pengujian ini adalah untuk memberikan informasi bahwa dengan metode pencampuran padat menggunakan planetary milling ( $\omega = 150$  rpm,  $t=5$  jam) serta pemanasan substitusi pada temperatur 1300  $^{\circ}\text{C}$  selama 16 jam, ukuran partikel yang terbentuk adalah 0,43  $\mu\text{m}$ . Serbuk yang telah *single phase* ini dapat langsung digunakan sebagai elektrolit dan digabungkan bersama anoda dan katoda membentuk SOFC. Salah satu metode yang dapat digunakan adalah melalui metode *slurry* (cetak sablon) dimana serbuk diencerkan menggunakan *binder* dan dilapisakan dengan ketebalan tertentu pada anoda serta katoda (Ren et al., 2014).

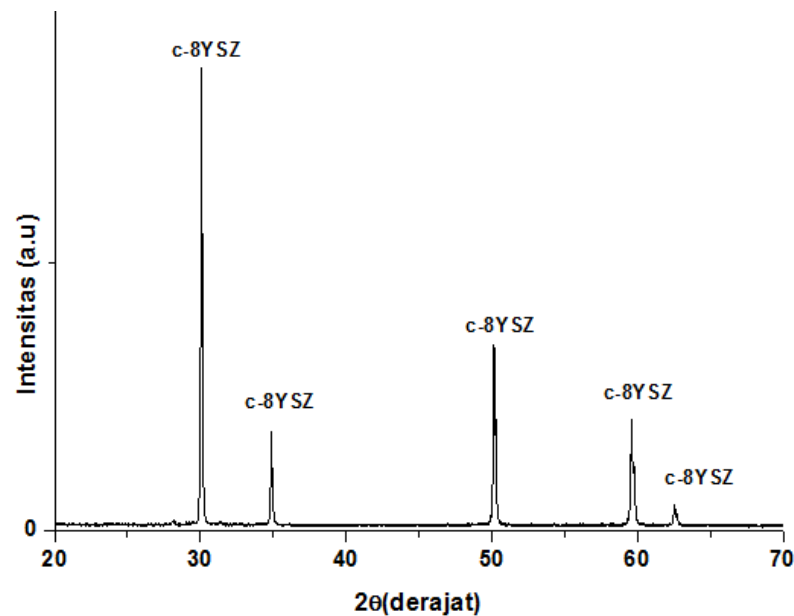
### 4.3 Sinter

#### 4.3.1 Sinter Serbuk Campuran 8YSZ

Serbuk Campuran 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  (8YSZ) disinter pada temperatur 1550  $^{\circ}\text{C}$  selama 4 jam. Temperatur yang diberikan, berdasarkan penelitian sebelumnya yang dilakukan oleh Ningsih (2015), Chowdari dan Wang



(2010) dan Dokiya (1995). Pada temperatur 1550 °C selama 4 jam memungkinkan terbentuknya fasa *cubic fluorite* 8YSZ. Pelet dari serbuk campuran 92 mol %  $\text{ZrO}_2$ -8 mol %  $\text{Y}_2\text{O}_3$  kemudian diberi nama pelet 8YSZ. Pola difraksi serbuk 8YSZ ditunjukkan pada Gambar 4.9.

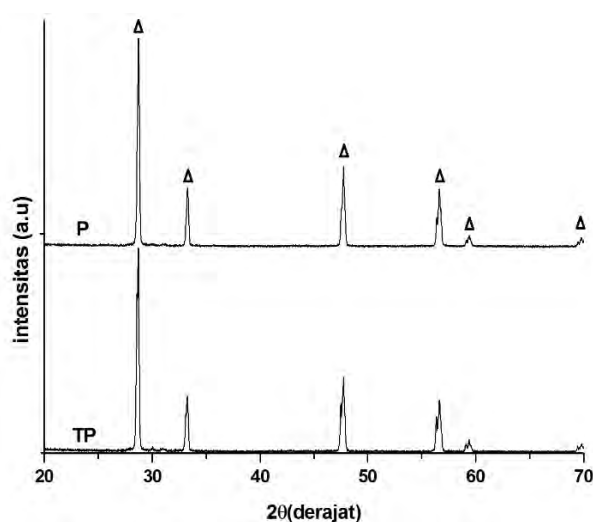


**Gambar 4.9.** Pola difraksi sinar  $\text{x}$  pada pelet 8YSZ yang disinter pada temperatur 1550 °C selama 4 Jam.

Berdasarkan Gambar 4.9 dapat dilihat bahwa fasa tunggal dari serbuk campuran 8 YSZ dapat terbentuk pada temperatur 1550 °C selama 4 Jam. Pola difraksi 8YSZ ini kemudian dianalisis menggunakan *software Rietica* dengan hasil sebagai berikut. Parameter kisi yang dimiliki oleh 8 YSZ adalah sebesar 3,1385 Å. Penambahan  $\text{Y}_2\text{O}_3$  menjadikan struktur  $\text{ZrO}_2$  lebih stabil pada tempeartur ruang dengan struktur kubik. Fasa kubik dari 8YSZ merupakan fasa yang digunakan pada sistem SOFC. Fasa ini memiliki struktur *fluorite* yang memungkinkan terjadinya vakansi dalam strukturnya sehingga konduktivitas ionik dapat terjadi pada bahan ini. Sebelumnya,  $\text{ZrO}_2$  memiliki struktur monoklinik dan bersifat konduktor yang buruk ( $\log \sigma T < -15 \text{ ScmK}^{-1}$ ).

#### 4.3.2 Sinter Serbuk Campuran 20 YBDC

Serbuk campuran  $\text{CeO}_2\text{-Yb}_2\text{O}_3$  (20YBDC) dikelompokkan menjadi 3 kelompok. Kelompok pertama adalah serbuk yang belum *single phase* (belum dipanaskan), kelompok kedua adalah serbuk yang telah *single phase* dan kelompok yang ketiga adalah kelompok serbuk yang telah *single phase* + 4 mol%  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Serbuk pertama dan serbuk kedua disinter pada temperatur 1350 °C selama 20 jam sedangkan serbuk ketiga disinter pada temperatur 1100 °C selama 8 jam. Perbedaan temperatur sinter yang diberikan berasal dari kajian pustaka yang telah dilakukan. Temperatur sinter yang biasa digunakan untuk proses sinter pada serbuk  $\text{CeO}_2$  yang didoping oleh oksida trivalen adalah (1500-1700 °C) (Kazlauskas et al., 2012) sedangkan temperatur sinter yang digunakan untuk pelet yang diberi *co-fired* berada 200 dibawah temperatur sinter tanpa *co-fired* yaitu (1350-1550 °C) (Fu et al., 2008). Berdasarkan informasi tersebut, pada penelitian ini akan dikaji temperatur lebih rendah dari daerah operasi temperatur sinter biasa yang telah digunakan, baik untuk pelet yang telah ditambahkan *co-fired* ataupun yang tidak ditambahkan *co-fired*. Serbuk yang telah disinter disebut pelet. Pelet TP digunakan untuk menyebut pelet yang bahan serbuk awalnya belum *single phase*, pelet P untuk pelet yang bahan serbuk awalnya sudah *single phase*. Pola-pola XRD semua pelet ditunjukkan pada Gambar 4.10 untuk P dan TP.



**Gambar 4.10.** Pola-pola difraksi pada sampel P (pemanasan) dan TP (tanpa pemanasan) yang disinter pada temperatur 1350 °C selama 20 jam ( $\Delta = \text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$ ).

Berdasarkan Gambar 4.10 terlihat bahwa pola-pola difraksi dari sampel P dan TP memiliki bentuk dan fasa yang sama. Fasa yang teridentifikasi adalah fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$ . Serbuk TP walaupun tidak dipanaskan terlebih dahulu pada temperatur terbentuknya fasa tunggal tetap dapat memiliki fasa tunggal pada suhu sinter  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 20 jam. Terbentuknya fasa tunggal dari sampel TP dikarenakan temperatur yang digunakan pada pemanasan tidak jauh berbeda dengan waktu sinter yang digunakan sehingga memungkinkan ion  $\text{Yb}^{3+}$  masuk kedalam struktur  $\text{CeO}_2$ .

Pola-pola difraksi semua serbuk dianalisis secara kuantitatif dengan metode Rietveld *refinement* dengan nilai *figures-of-merits* seperti pada Tabel 4.2.

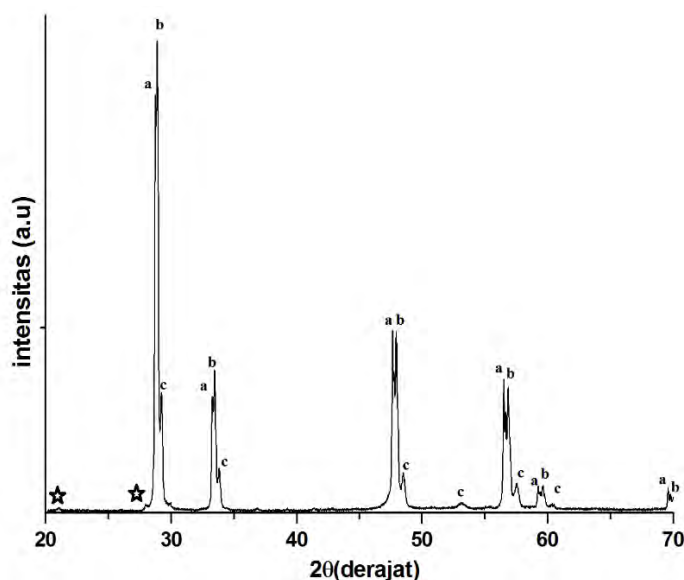
**Tabel 4.2.** Nilai *figures-of-merits* dan nilai parameter kisi untuk pelet P dan TP

Parameter	Pelet P	Pelet TP
$R_p$	13,68	15,14
$R_{wp}$	17,43	18,89
GoF	2,35	3,08
Parameter Kisi ( $\text{\AA}$ )	5,3939	5,3169

Nilai *figures-of-merits* yang diperoleh telah memenuhi syarat pola penghalusan dengan menggunakan *software Rietica* ( $\text{GOF} < 4$ ) (Kisi, 1998) sehingga informasi yang diperoleh dari output *Rietica* dapat digunakan untuk analisa lebih lanjut. Berdasarkan Tabel 4.2 dapat dilihat bahwa nilai parameter kisi untuk pelet P lebih besar jika dibandingkan dengan pelet TP. Besarnya parameter kisi pelet P disebabkan oleh temperatur yang diberikan pada pelet P lebih lama jika dibandingkan dengan pelet TP. Sebelumnya, serbuk yang digunakan untuk membuat pelet P adalah serbuk yang dipanaskan  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 16 jam kemudian disinter pada temperatur  $1350\text{ }^{\circ}\text{C}$  selama 20 jam. Besarnya temperatur yang diberikan akan mengakibatkan terjadinya ekspansi kisi yang besar. Ekspansi kisi yang besar akan menyebabkan ukuran parameter kisi semakin besar. Sehingga parameter kisi pelet P lebih besar dari pelet TP. Ekspansi kisi yang terjadi pada  $\text{CeO}_2$  akibat doping yang diberikan telah dilaporkan oleh (Mandal et al., 2006). Mandal et al (2006) menyebutkan bahwa persentase ekspansi termal dari sampel

CeO<sub>2</sub> yang didoping oleh trivalen mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya temperatur yang diberikan.

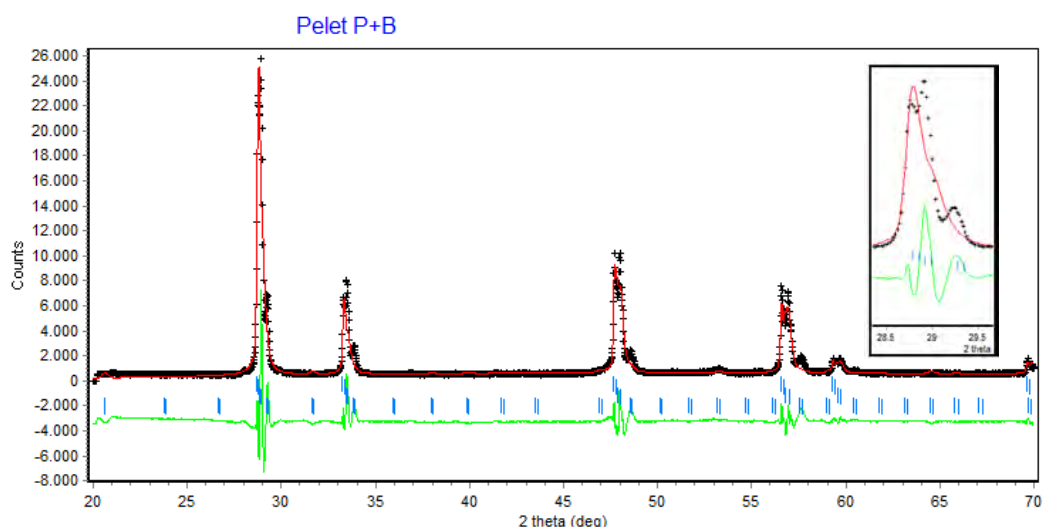
Sedangkan untuk sampel P+B (Pemanasan + *co-fired* Bi<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), pola difraksi sinar-x ditunjukkan pada Gambar 4.11.



**Gambar 4.11.** Pola difraksi sinar-x pada pelet P+B yang disinter pada temperatur 1100 °C selama 8 jam ( a= CeO<sub>2</sub> b= Yb<sub>0,1</sub>Ce<sub>0,9</sub>O<sub>1,95</sub> c=Bi<sub>5</sub>Yb<sub>3</sub>O<sub>12</sub> dan ★=fasa pengotor).

Pola difraksi dari pelet P+B terlihat pecah (Gambar 4.11), misalnya untuk puncak pertama pada  $2\theta = 28,44$  dan  $2\theta = 28,6$ . Pecahnya bentuk puncak yang sama di  $2\theta$  yang berbeda menunjukkan fasa yang berbeda. Fasa yang teridentifikasi dengan menggunakan *software Match 2!* yaitu fasa Yb<sub>0,2</sub>Ce<sub>0,8</sub>O<sub>1,9</sub> kubik, Bi<sub>5</sub>Yb<sub>3</sub>O<sub>12</sub> kubik dan CeO<sub>2</sub> kubik. Namun, jika terdapat fasa baru Bi<sub>5</sub>Yb<sub>3</sub>O<sub>12</sub> kubik dan CeO<sub>2</sub> kubik seharusnya konsentrasi Yb dan Ce berkurang pada phase Yb<sub>0,2</sub>Ce<sub>0,8</sub>O<sub>1,9</sub> kubik berkurang. Phase Yb<sub>0,2</sub>Ce<sub>0,8</sub>O<sub>1,9</sub> kubik seharusnya berkurang karena ion Yb<sup>3+</sup> keluar dari struktur *fluorite* Yb<sub>0,20</sub>Ce<sub>0,8</sub>O<sub>1,90</sub> kubik membentuk fasa baru Bi<sub>5</sub>Yb<sub>3</sub>O<sub>12</sub> kubik sedangkan struktur yang ditinggalkan ion Yb<sup>3+</sup> membentuk struktur baru CeO<sub>2</sub> kubik. Munculnya fasa baru tersebut mengakibatkan persentase mol dari Yb<sup>3+</sup> didalam struktur *fluorite* Yb<sub>0,20</sub>Ce<sub>0,8</sub>O<sub>1,90</sub> berkurang sehingga seharusnya membentuk fasa Yb<sub>x</sub>Ce<sub>1-x</sub>O<sub>2-x/2</sub> kubik.

Pola XRD P+B dianalisis lebih lanjut dengan *software Rietica*. Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.12.



**Gambar 4.12.** Pola hasil penghalusan pelet P+B dengan menggunakan metode Rietveld 3 fasa.

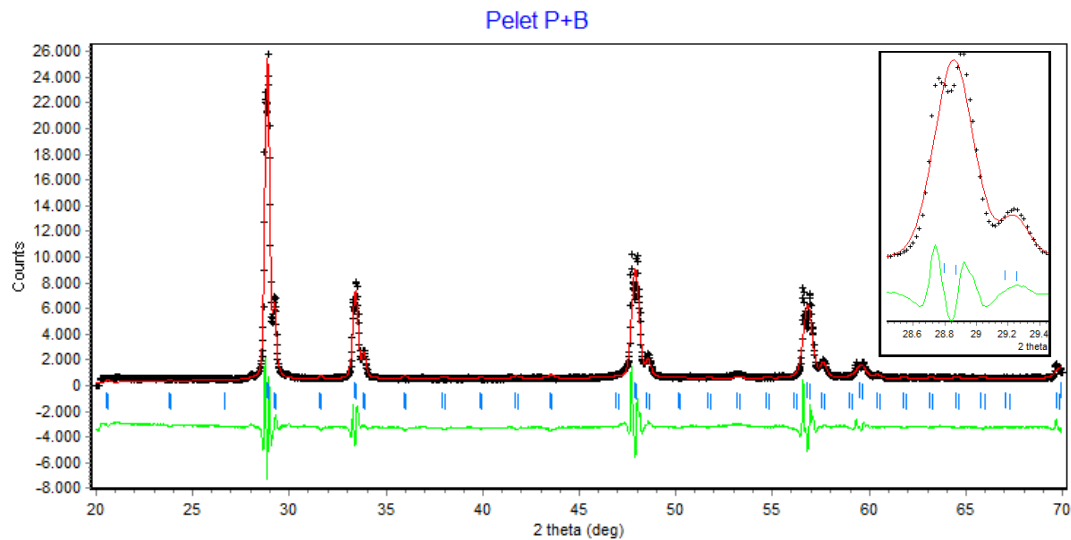
Input yang diberikan pada *software Rietica* untuk pola penghalusan pada Gambar 4.12 adalah 3 fasa. Fasa tersebut adalah fasa  $\text{Yb}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,9}$  kubik,  $\text{CeO}_2$  kubik dan fasa  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$ . Nilai *figures-of-merits* dari pola hasil penghalusan pelet P+B ditunjukkan pada Tabel 4.3.

**Tabel 4.3.** Nilai *figures-of-merits* untuk pelet P+B dengan input 3 fasa pada *Rietica*

Sample	Parameter						
	$R_p$	$R_{wp}$	$R_{exp}$	GoF	$R_B$		
					Fasa 1	Fasa 2	Fasa 3
<b>P+B</b>	14,90	22,23	3,05	53,02	4,84	7,26	18,33

(keterangan Fasa 1:  $\text{Yb}_{0,10}\text{Ce}_{0,9}\text{O}_{1,95}$ , fasa 2:  $\text{CeO}_2$  dan fasa 3  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$ )

Dengan model yang diberikan terlihat bahwa  $R_B$  fasa 3 masih tinggi sehingga besar kemungkinan nilai GOF masih tinggi. Dari Gambar 4.12 terlihat model  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  tidak cocok dengan data difraksi yang dimiliki sampel. Namun, jika input yang dimasukan hanya dua fasa yaitu fasa  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  dan  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  diperoleh hasil sebagai berikut.



**Gambar 4.13.** Pola hasil penghalusan pelet P+B dengan menggunakan metode Rietveld 2 fasa.

Nilai *figures-of-merits* yang diperoleh dengan 2 input fasa yang diberikan ditunjukkan pada Tabel 4.4.

**Tabel 4.4.** Nilai *figures-of-merits* untuk pelet P+B dengan input 2 fasa pada *Rietica*

Sample	Parameter					
	$R_p$	$R_{wp}$	$R_{exp}$	GoF	$R_B$	
					Fasa 1	Fasa 2
P+B	13,91	20,04	3,05	43,14	4,09	7,38

(keterangan Fasa 1:  $Yb_{0,10}Ce_{0,9}O_{1,95}$  , fasa 2:  $Bi_5Yb_3O_{12}$ )

Jika input yang dimasukan 2 fasa nilai  $R_B$  dari fasa 2 lebih kecil jika dibandingkan dengan input yang dimasukan 3 fasa. Jika dilihat dari nilai GoF, baik input 2 fasa atau 3 fasa nilai GoF belum memenuhi kriteria standar penerimaan metode pencocokan. Nilai GoF yang diperkenankan adalah kurang dari 4 (Kisi, 1994). Namun jika kita melihat definisi dari GoF, nilai ini dapat diperoleh dengan persamaan sebagai berikut:

$$\begin{aligned}
 \text{GoF} &= \left[ \frac{R_{wp}}{R_{exp}} \right] \\
 &= 6,57
 \end{aligned}
 \tag{4.2}$$

Nilainya lebih kecil dari GoF yang tertera pada hasil output. Pola difraksi dari pelet P+B tidak dapat dicocokkan dengan *software Rietica*. Hal ini diduga kuat oleh pola difraksinya terpecah sehingga tingkat kecocokannya tidak memenuhi standar pengambilan. Metode lain yang dapat digunakan untuk mendapatkan parameter kisi dari masing-masing fasa adalah menggunakan metode perhitungan manual menggunakan Hukum Bragg (terdapat dilampiran C). Nilai parameter kisi dengan menggunakan hukum Bragg diperoleh hasil sebagai berikut.  $\text{CeO}_2$  memiliki parameter kisi 5,4254 Å,  $\text{Yb}_x\text{Ce}_{1-x}\text{O}_{2-x/2}$  memiliki parameter kisi 5,3980 Å dan  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  memiliki parameter kisi 10,5343 Å.

#### 4.4 Perhitungan Densitas

Semua pelet diuji nilai densitasnya dengan menggunakan metode Archimedes. Data yang diperlukan untuk mendapatkan nilai densitas menggunakan metode Archimedes adalah massa kering, massa basah dan massa dalam air. Perhitungan nilai densitas menggunakan Persamaan 3.1. Nilai densitas yang diperoleh dari metode Archimedes disebut sebagai densitas ukur. Nilai densitas ukur yang dibandingkan dengan densitas teori akan menghasilkan nilai densitas relatif. Perhitungan nilai densitas ukur didasarkan pada susunan atom didalam kristal *fluorite*.

**Tabel 4.5.** Nilai densitas teoritik, archimedes dan relatif untuk semua sampel

Sampel	Densitas		
	Teoritik (g/cc)	Archimedes (g/cc)	Relatif (%)
8YSZ	6,01	5,81	96,70
TP	7,66	5,09	66,47
P	7,66	4,55	59,42
P+B	7,71	5,86	76,53

Berdasarkan Tabel 4.5 dapat diketahui bahwa nilai densitas relatif dari P+B lebih tinggi walaupun temperatur sinternya (1100 °C selama 8 jam) dibawah temperatur sinter (1350 °C selama 20 J) sampel TP dan P. Tingginya nilai densitas pada sampel P+B disebabkan karena selama proses sintering terjadi proses

pelarutan dan pengendapan. Proses pelarutan ini terjadi karena titik leleh dari  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  ( $817\text{ }^\circ\text{C}$ ) lebih rendah dari titik leleh  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  ( $\text{CeO}_2 = 2040\text{ }^\circ\text{C}$  dan  $\text{Yb}_2\text{O}_3 = 2355\text{ }^\circ\text{C}$ ) sehingga  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  membasahi  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$ . Selama terjadi pembasahan, butir-butir kecil larut kedalam fasa cair, bermigrasi melalui fasa cair dan kemudian mengendap dipermukaan butir berukuran besar. Dengan adanya fasa cair dari  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  akan meningkatkan kohesi antar partikel-partikel penyusun benda sehingga eliminasi porositasnya semakin tinggi. Densitas belum mencapai 90-100% dengan penambahan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  disebabkan karena kurangnya temperatur sinter yang digunakan. Temperatur sinter yang digunakan dengan penambahan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  pada berbagai variasi konsentrasi berkisar antara temperatur  $1350\text{--}1450\text{ }^\circ\text{C}$  selama 6 jam (Raghvendra and Singh, 2015)(Fu et al., 2008).

Densitas sampel TP lebih tinggi dibandingkan dengan sampel P walaupun kedua sampel mengalami sintering fasa padat. Perbedaan nilai densitas ini disebabkan karena pada sampel P pertumbuhan butir telah terjadi karena telah mengalami peristiwa pemanasan terlebih dahulu. Energi yang diperoleh selama proses pemanasan digunakan untuk *rearrangement* partikel-partikel. Pemanasan terjadi pada temperatur  $1300\text{ }^\circ\text{C}$  selama 16 jam dan waktu sinter tidak jauh berbeda dengan temperatur pemanasan yaitu  $1350\text{ }^\circ\text{C}$  selama 20 jam. Perbedaan yang sangat relatif sedikit antara temperatur sinter dengan temperatur pemanasan menyebabkan susahnya butir untuk mengalami pertumbuhan kembali kecuali temperatur sinter berada pada kisaran ( $1500\text{--}1700\text{ }^\circ\text{C}$ ). Butir yang susah mengalami pertumbuhan mengakibatkan sulitnya eliminasi porositas. Berbeda dengan pelet P, pelet TP tidak mengalami peristiwa pemanasan terlebih dahulu. Serbuk SC yang diperoleh dari reaksi padat langsung disinter pada temperatur  $1350\text{ }^\circ\text{C}$  selama 20 jam. Peristiwa yang terjadi pada pelet TP selama sintering adalah peristiwa penyusunan kembali (*rerangement*) (Yb terhadap Ce dan Ce terhadap Ce) dimana sedikit terjadi gerakan atau rotasi partikel-partikel untuk mempertinggi jumlah kontak antar partikel dan pembentukan kaitan antar butir (*neck*). Tahapan selanjutnya adalah tumbuhnya ukuran kaitan antar butir dan menurunnya porositas akibat peristiwa mendekatnya partikel-partikel. Pada tahap akhir, eliminasi porositas terjadi. Eliminasi porositas melalui difusi batas antar butir dan pertumbuhan butir. Densitas TP dan P belum mencapai 90-100% dikarenakan rendahnya temperatur sinter yang digunakan.



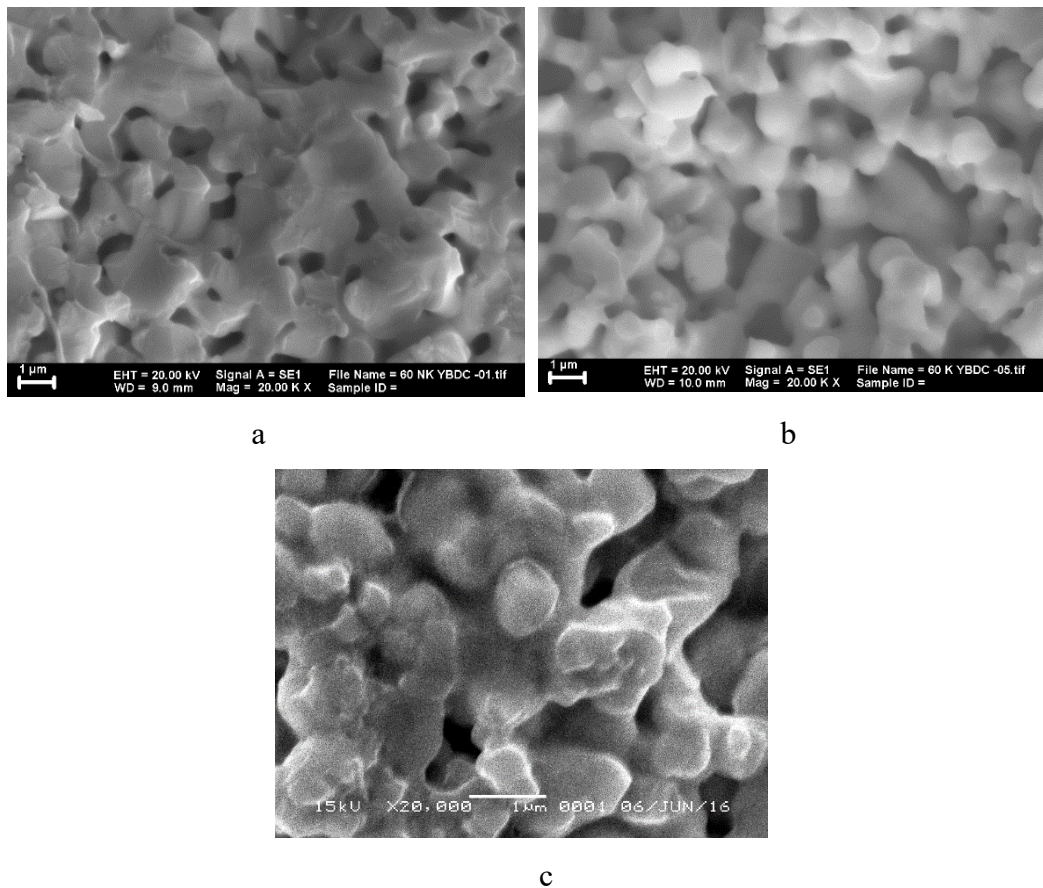
Temperatur sinter yang digunakan untuk cerium yang didoping bahan keramik supaya memiliki densitas 90-100% berkisar antara 1500-1700 °C tergantung pada jenis dopan, konsentrasi dopan dan metode yang digunakan (Fu et al., 2008)

Densitas pelet 8YSZ memiliki nilai densitas yang sangat tinggi (Tabel 4.8). Nilai densitas yang sangat tinggi pada pelet 8 YSZ disebabkan karena faktor temperatur yang diberikan sangat tinggi 1550 °C. Telah disebutkan sebelumnya, salah satu daya dorong sintering adalah temperatur. Semakin tinggi temperatur maka difusi yang terjadi akan semakin cepat dan semakin lama. Ketika difusi semakin cepat dan semakin lama maka proses densifikasi akan semakin baik. Selain dari itu peningkatan temperatur selalu meningkatkan mekanisme difusi pada butir sehingga sampel akan mencapai densifikasi. Mekanisme pada butir akan mencapai densifikasi dibandingkan mekanisme difusi pada permukaan dan difusi batas butir karena energi aktivasi pada butir lebih tinggi dibandingkan energi aktivasi pada mekanisme yang lain (Barsoum and Barsoum, 2002).

Jadi dari beberapa sampel yang divariasikan terdapat 3 faktor yang mempengaruhi sinter. Faktor yang pertama adalah impuritas. Impuritas merupakan bahan yang ditambahkan ke dalam sampel dengan tujuan untuk menurunkan temperatur sinter. Ini sangat diharapkan untuk proses fabrikasi SOFC. Temperatur yang digunakan untuk fabrikasi SOFC berkisar antara 500-800 °C. Proses yang terjadi merupakan proses *liquid sintering*. Faktor yang kedua adalah ukuran butir, ukuran butir pada serbuk TP diduga memiliki butir yang belum mengalami pertumbuhan sehingga ketika diberi temperatur yang tinggi 1350 °C selama 20 jam pertumbuhan butir akan lebih mudah terjadi. Faktor yang ketiga adalah temperatur. Semakin tinggi temperatur maka proses densifikasi akan semakin mudah terjadi (Barsoum and Barsoum, 2002)(Chiang et al., 1996).

#### 4.5 Pengujian SEM

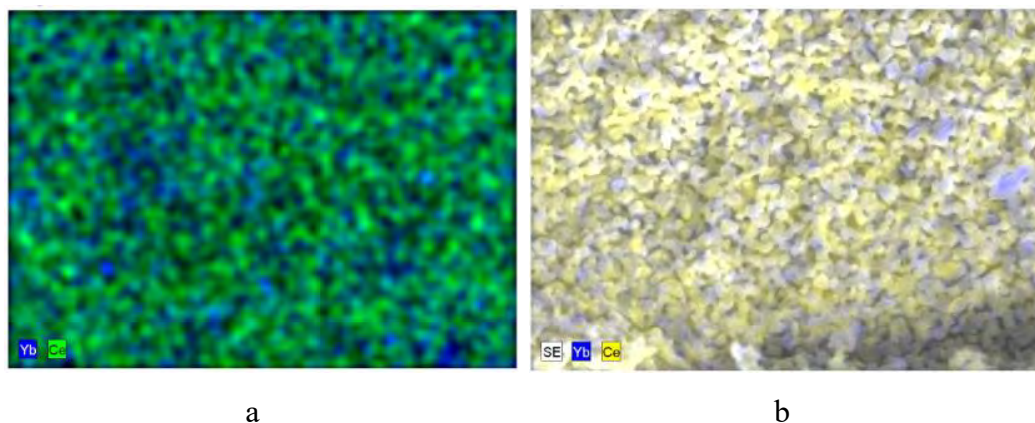
Pengujian mikrostruktur dilakukan dengan menggunakan *scanning mikroskop elektron* (SEM). Hasil yang diperoleh ditunjukkan pada Gambar 4.14.



**Gambar 4.14.** Struktur mikro untuk semua pelet a. TP b.P dan c. P+B

Pada Gambar 4.14 dapat dilihat bahwa sampel P terlihat memiliki porositas yang lebih tinggi jika dibandingkan dengan sampel TP. Tinginya porositas pada sampel P sesuai dengan hasil pengujian densitas menggunakan metode Archimedes. Butir-butir pada sampel P belum terhubung satu sama lainnya dan membutuhkan energi yang lebih besar untuk menumbuhkan butir sehingga eliminasi porositas dapat terjadi. Jenis porositas dari sampel P dan TP adalah *open porosity* karena antara satu pori dengan pori yang lain saling bersambungan. Porositas pada sampel TP dan P dapat dieliminasi kembali dengan peningkatan temperatur sinter. Peningkatan temperatur sinter menyebabkan butir-butan terus tumbuh sehingga *open porosity* dapat dieliminasi. Jadi dengan waktu sinter 1350 °C selama 20 jam belum cukup untuk membuat sampel P dan TP memiliki densitas yang tinggi.

Sampel P+ B terlihat memiliki porositas sama seperti pada sampel P dan TP. Sampel ini terlihat lebih poros dibandingkan dengan sampel TP walaupun hasil pengujian densitas dengan menggunakan Archimedes menunjukkan sampel P+B lebih *dense* dari sampel TP. Perbedaan interpretasi ini dapat dijelaskan sebagai berikut. Sampel yang diuji dengan menggunakan metode Archimedes merupakan sampel utuh (seluruh bagian diuji densitasnya) sehingga mencerminkan nilai dari keseluruhan bagian dari sampel sedangkan sampel yang diuji dengan menggunakan SEM, hanya bagian patahan saja sehingga memungkinkan terdapat bagian tertentu yang memiliki poros tinggi dan bagian lain memiliki poros rendah. Ketika diuji dengan SEM, memungkinkan patahan yang diuji memiliki daerah poros yang lebih tinggi untuk sampel P+B. Secara kuantitatif, pelet P+B terlihat memiliki ukuran butir yang lebih besar jika dibandingkan dengan sampel P dan sampel TP. Begitu juga dengan sampel TP memiliki ukuran butir yang lebih besar dibandingkan dengan ukuran butir sampel P. Penentuan ukuran butir dapat dilakukan dengan menggunakan Persamaan Mendelson. Dari hasil perhitungan diperoleh rata-rata ukuran butir dari masing-masing sampel adalah sebagai berikut. Ukuran rata-rata butir sampel TP adalah 1,2  $\mu\text{m}$ , ukuran rata-rata butir sampel P adalah 0,83  $\mu\text{m}$  sedangkan ukuran rata-rata butir untuk sampel P+B adalah 0,75  $\mu\text{m}$ . Nilai ukuran rata-rata butir P+B terlihat paling kecil diantara semua sampel, hal ini dikarenakan temperatur sinternya paling rendah dibandingkan semua sampel. Pelet TP memiliki ukuran butir yang paling besar, hal ini sesuai dengan asumsi awal pada pengujian densitas sebelumnya. Butir pada sampel TP mudah mengalami pertumbuhan karena tidak dilakukan pemanasan sebelumnya. Jika butir dipanaskan pada temperatur 1300 °C selama 16 jam kemudian disinter pada suhu sinter yang relatif sama dengan temperatur kalsinasi maka pertumbuhan butir yang terjadi tidak banyak karena peristiwa difusi sudah terjadi sebelumnya. Pertumbuhan dapat kembali terjadi ketika temperatur sinter lebih tinggi dari temperatur kalsinasi. Suhu sinter yang biasa dipakai untuk densifikasi  $\text{CeO}_2$  berkisar antara 1550-1700 °C.



**Gambar 4.15.** Distribusi Ce dan Yb hasil SEM-EDX pada pelet a. TP b. P

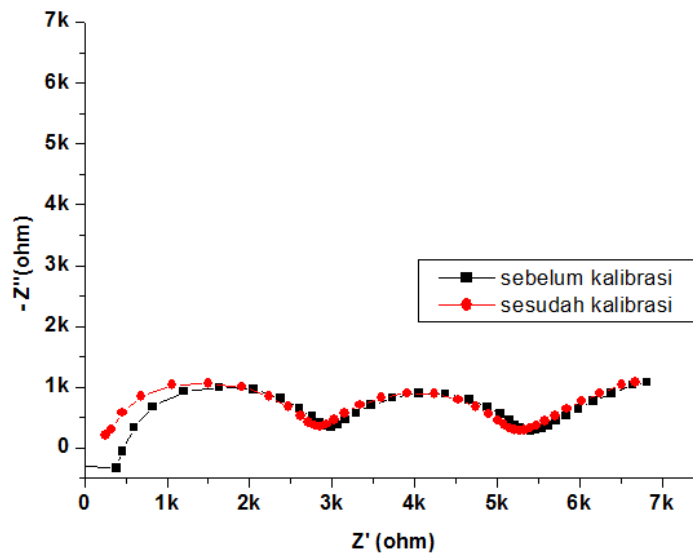
Berdasarkan Gambar 4.15 terlihat bahwa sebaran Yb terhadap Ce masih belum homogen untuk sampel TP dan P. Gambar 4.15 menunjukkan adanya populasi Yb yang masih berkumpul (terkurung disatu titik) belum menyebar ke Ce. Hal ini dapat dijelaskan dengan menggunakan pola XRD pada Gambar 4.10. Pola XRD pada Gambar 4.10 menunjukkan adanya *peak* yang sangat kecil untuk Yb. Walaupun puncak tersebut diabaikan terhadap puncak tertinggi namun dalam tatanan atomik terlihat jelas keberadaannya. Gambaran sampel P menunjukkan populasi Yb yang lebih tersebar dibandingkan dengan sampel TP. Distribusi Yb terhadap Ce pada sampel P lebih menyebar jika dibandingkan dengan sampel TP. Hal ini disebabkan karena sampel P dilakukan pemanasan terlebih dahulu sehingga memungkinkan difusi ion  $\text{Yb}^{3+}$  kedalam struktur  $\text{CeO}_2$  *fluorite* lebih menyebar keberadaannya.

#### 4.6 Karakterisasi Sifat Listrik

Karakterisasi sifat listrik menggunakan *Solartron Impedance Analyzer* 1260. Nilai Impedansi masing-masing pelet diukur dari temperatur 100-850 °C dengan interval 50 °C, daerah frekuensi yang digunakan adalah 32 MHZ-0,1 HZ. Nilai impedansi yang diperoleh pada saat pengukuran listrik terdiri dari impedansi real ( $Z'$ ) dan impedansi imajiner ( $Z''$ ). Nilai impedansi real dan imajiner memuat informasi mengenai rangkaian listrik RC pada sampel. Bentuk sampel keramik selama pengukuran listrik dapat dianalogikan sebagai rangkaian RC paralel jika diberikan medan listrik dari luar (Moulson dan Herbert, 2003). Beda potensial yang diberikan selama pengukuran listrik adalah 0,1 volt.

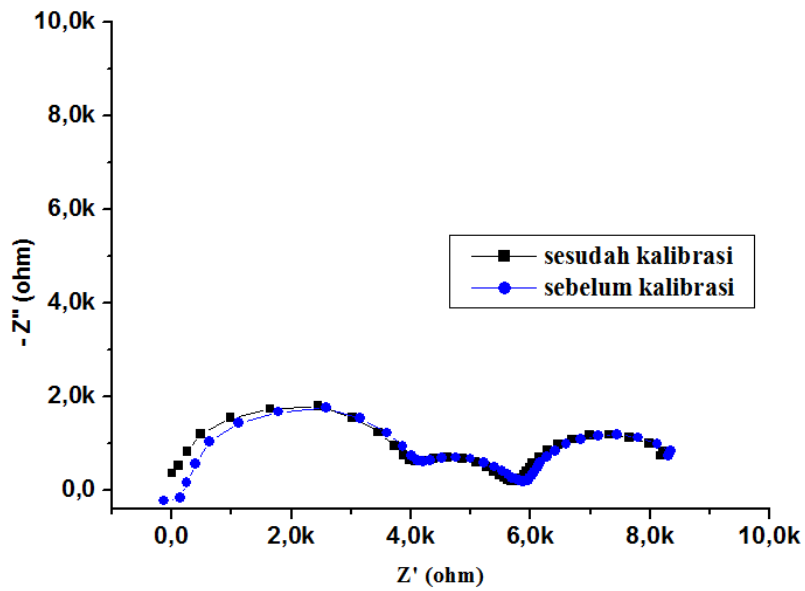
#### 4.6.1 Kalibrasi Induktansi Parasitik

Sebelum menentukan resistansi dari masing-masing temperatur pengujian, nilai impedansi dikalibrasi terlebih dahulu terhadap nilai impedansi induktansi parasitik. Peristiwa munculnya impedansi induktansi parasitik perlu dikalibrasi terlebih dahulu supaya tidak menimbulkan eror untuk semua frekuensi yang diukur. Kalibrasi dilakukan dengan mengurangkan data listrik yang diperoleh pada sampel dengan data listrik kawat yang panjangnya sama dengan panjang kawat yang digunakan pada saat sampel diukur data listriknya. Nilai impedansi sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi digambarkan dengan curva *complex plane plots*. *Complex plane plots* atau diagram Agrand adalah plot yang menggambarkan hubungan antara impedansi real ( $Z'$ ) dengan impedansi imajiner ( $-Z''$ ) (Lasia, 2014). Hasil kalibrasi untuk pelet 8YSZ ditunjukkan pada Gambar 4.16.

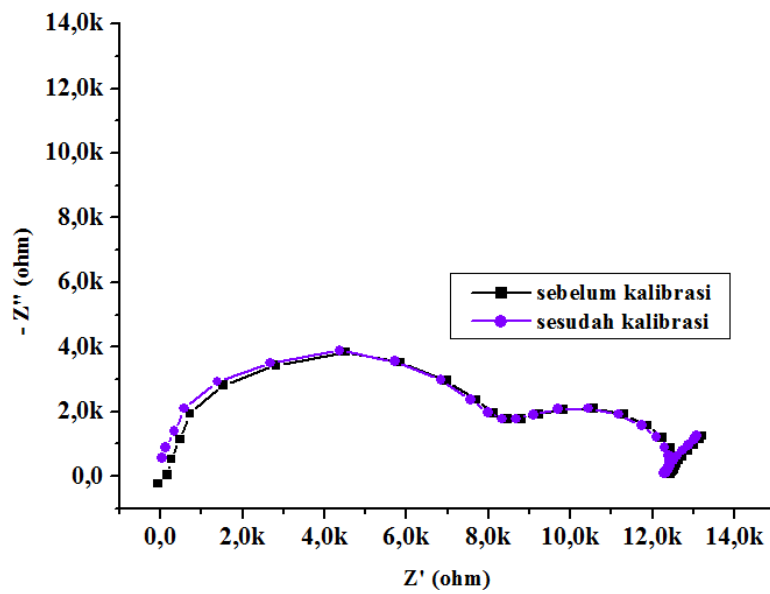


**Gambar 4.16.** Contoh *Complex plane plots* pada temperatur 450 °C sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet 8YSZ.

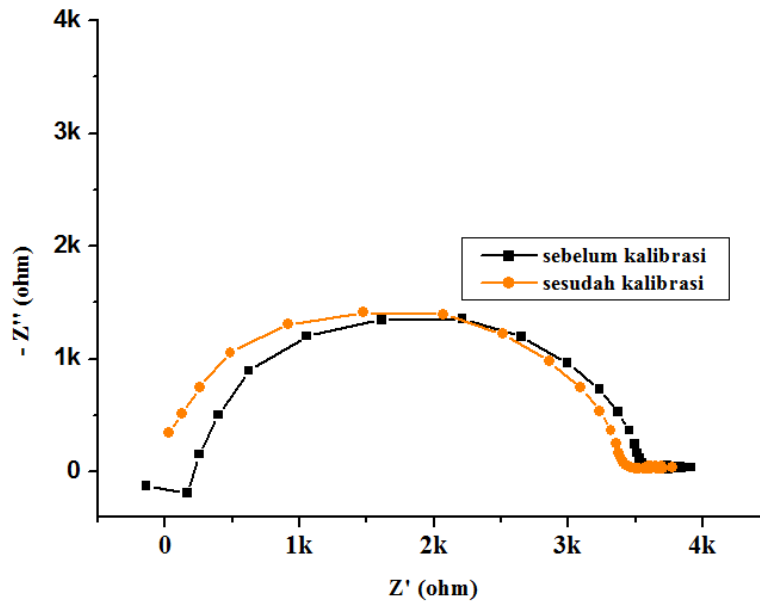
Berdasarkan Gambar 4.18, sebelum kalibrasi dilakukan terdapat ekor *semicircle* yang mempunyai harga negatif. Harga negatif ini menunjukkan adanya induktansi didalam rangkaian. Hasil kalibrasi menunjukkan *semicircle* lebih lebar dari sebelumnya. Hal yang sama juga terjadi pada 2 sampel yang lain. Hasil kalibrasinya dapat dilihat pada Gambar 4.17 – 4.19.



**Gambar 4.17.** Contoh *Complex plane plots* pada temperatur 450 °C sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet TP (keterangan k= 1000)



**Gambar 4.18.** Contoh *Complex plane plots* pada temperatur 450 °C sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet P (keterangan k= 1000).

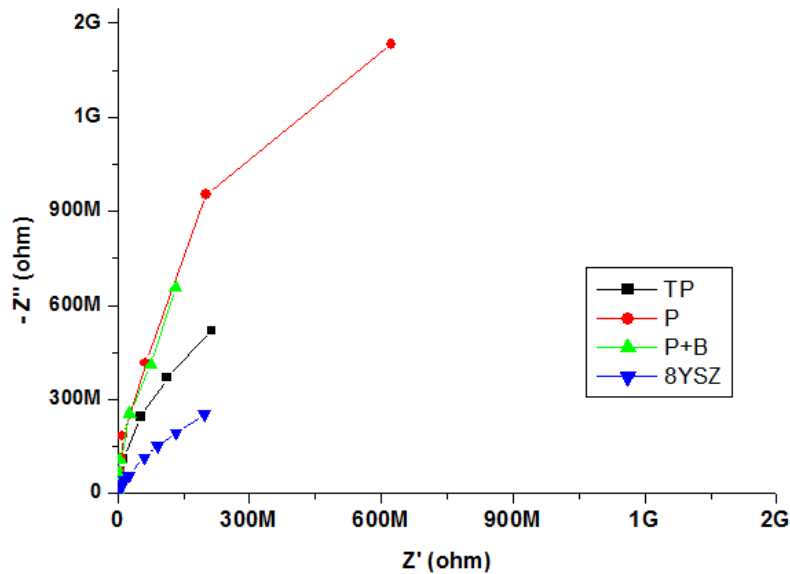


**Gambar 4.19.** Contoh *Complex plane plots* pada temperatur 450 °C sebelum dikalibrasi dan sesudah dikalibrasi pada pelet P+B.

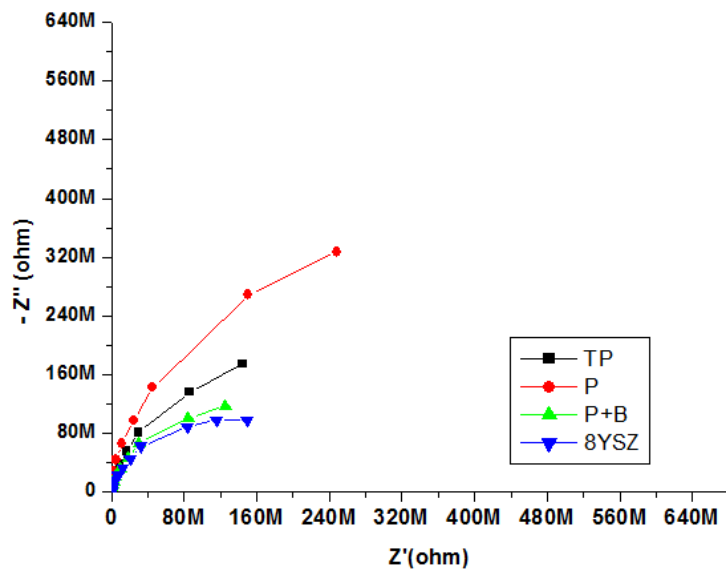
Peristiwa induktansi muncul karena adanya pengaruh dari kawat yang ditempelkan pada sampel. Induktansi yang terjadi pada kawat muncul karena timbulnya medan magnet oleh medan listrik. Kawat yang ditempelkan memiliki panjang 1,5 meter dari elektroda sampel ke titik pengujian pada solartron. Pada temperatur rendah (100-300 °C), induktansi parasitik belum terlihat jelas jika dibandingkan pada temperatur (350-850 °C). Pada saat kawat dialiri arus listrik maka muncul reaktansi konduktif. Besarnya reaktansi konduktif tergantung dari besarnya nilai induktansi kawat dan frekuensi arus bolak-balik. Semakin besar frekuensi arus bolak-balik maka semakin besar reaktansi konduktifnya. Efek induktansi selalu menuju ke nilai positif dari nilai impedansi imajiner seperti yang terlihat pada Gambar 4.17-4.19. Peristiwa induktansi mengakibatkan nilai resistansi berubah untuk semua frekuensi. Ketika dikalibrasi, plot yang berada dibawah menjadi hilang sehingga *complex plane plots* memiliki nilai positif untuk semua frekuensi pengukuran. Nilai impedansi yang berada dibawah hilang disebabkan karena nilai negatif tersebut sudah dikurangkan dengan nilai impedansi dari kawat yang digunakan selama pengukuran. Jadi, untuk perhitungan resistansi untuk semua sampel tidak melibatkan reaktansi induktif.

#### 4.6.2 Nilai Impedansi untuk semua sampel

Nilai impedansi untuk semua sampel pada temperatur rendah dapat dilihat pada Gambar 4.20 dan 4.21.



**Gambar 4.20.** *Complex plane plots* untuk semua pelet dari frekuensi 32MHZ -0,1 mHz pada temperatur 100 °C.

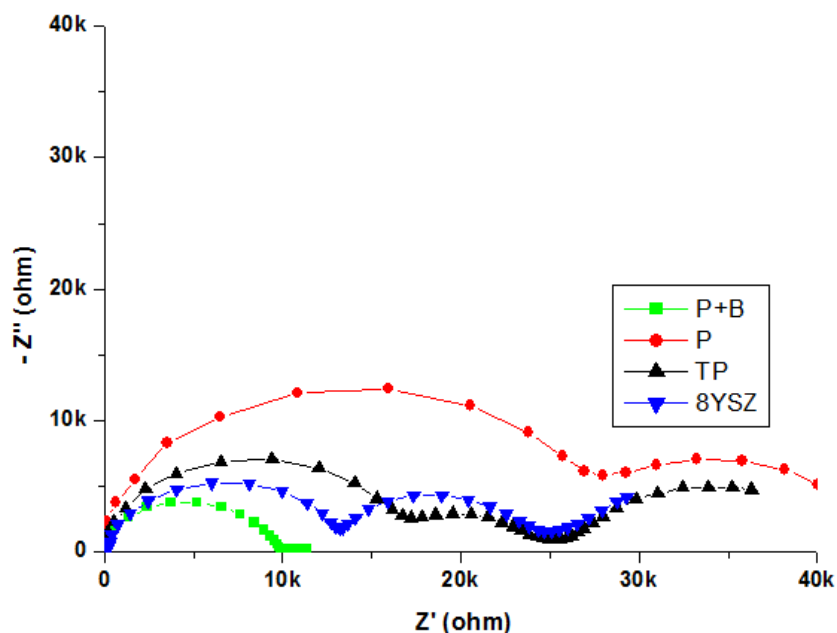


**Gambar 4.21.** *Complex plane plots* untuk semua pelet dari frekuensi 32MHZ -0,1 mHz pada temperatur 150 °C.

Pada temperatur (100-150 °C) *complex plane plot* hanya menunjukkan satu *semicircle* (Gambar 4.20). Kehadiran butir, batas butir dan elektroda bergabung



menjadi satu kurva. Bergabungnya butir, batas butir dan elektroda dikarenakan konstanta waktu ( $\tau = RC$ ) dari rangkaian listriknya sangat besar sehingga hanya terbentuk satu *semicircle*. Hal ini dapat dilihat dari nilai impedansi real dan impedansi imajiner berada pada kisaran nilai  $2 \times 10^9$  ohm untuk  $T=100$  °C dan  $2,8 \times 10^8$  ohm untuk  $T=150$  °C. *Complex plane plots* mulai menunjukkan 3 *semicircle* (butir, batas butir dan elektroda) pada temperatur 350-650 °C untuk sampel P dan TP, sampel 8 YSZ menunjukkan 3 *semicircle* pada temperatur 350-550 °C. Sedangkan untuk sampel P+B, *complex plane plot* menunjukkan 2 *semicircle* yaitu butir dan batas butir+elektroda. Pada temperatur rendah untuk semua sampel terlihat sangat resistif. Nilai resistif ini disebabkan karena belum cukupnya energi dari vakansi untuk bergerak. Vakansi yang terdapat pada bahan keramik di temperatur rendah (100-150 °C) hanya bervibrasi disitusnya masing-masing. Vakansi bisa bergerak ketika energi aktivasi yang dibutuhkan untuk bergerak dan meloncat sudah terpenuhi. Berikut ditampilkan *complex plane plots* pada  $T=400$  °C (Gambar 4.22).



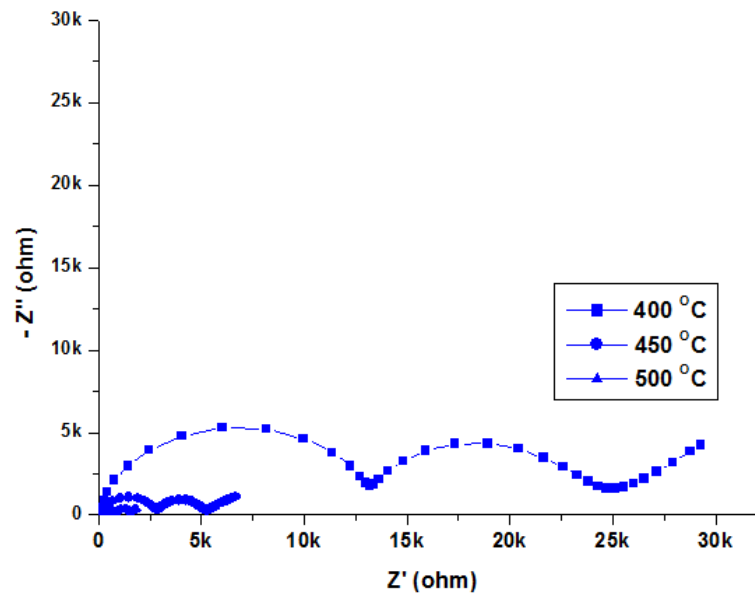
**Gambar 4.22.** Contoh *Complex plane plots* untuk semua sampel dari frekuensi 32MHz -0,1 mHz pada temperatur  $T= 400$  °C.

Berdasarkan Gambar 4.22 dapat diketahui bahwa pada temperatur 400 °C *complex plane plots* menunjukkan pemisahan *semicircle*. Pemisahan *complex plane plots* dapat dijelaskan sebagai berikut. Ketika terdapat dua konstanta waktu sangat berbeda maka akan terbentuk 2 *semicircle* yang terpisah pada *complex plane plots* (Lasia, 2014). Begitu juga, jika terdapat 3 konstanta waktu yang sangat berbeda maka akan terbentuk 3 *semicircle* yang terpisah pada *complex plane plots*. Penentuan besar kecilnya konstanta waktu sangat sulit untuk diperkirakan secara tepat, hanya analisis impedansi yang dapat menentukan suatu kurva terpisah atau tidak. Namun, untuk kepentingan praktis, pemisahan tersebut dapat diperkirakan dengan menggunakan *ploting* menggunakan *software Matlab*. Tiga *semicircle* yang terdapat pada pelet P, TP dan 8 YSZ adalah butir (frekuensi tinggi), batas butir (frekuensi menengah) dan elektroda (frekuensi rendah) sedangkan 2 *semicircle* yang terdapat pada sampel P+PB menunjukkan butir (frekuensi tinggi), batas butir+elektroda (frekuensi menengah). Selain dari pemisahan *semicircle*, dapat dilihat juga bahwa pelet P+B memiliki nilai impedansi real dan impedansi imajiner yang lebih rendah dari pelet P dan TP. Analisa lebih jauh diperlukan perhitungan nilai resistansi dengan menggunakan Matlab.

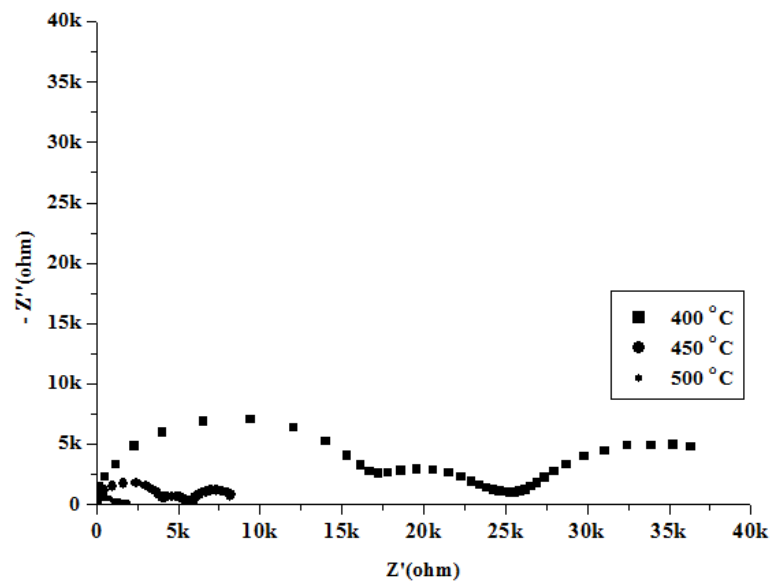
#### 4.6.3. Nilai Impedansi pada beberapa temperatur

Nilai impedansi pada beberapa temperatur ditunjukkan pada Gambar 4.23-4.26. Pengambilan 3 temperatur (400-500 °C) disebabkan karena nilai impedansi real dan imajiner tidak terlalu jauh nilainya sehingga bisa ditumpuk dan bisa dibandingkan. Selain dari itu, pada temperatur (400-500 °C) sudah menunjukkan 3 *semicircle* untuk sampel 8YSZ, TP dan P sedangkan 2 *semicircle* pada sampel P+B. Kenaikan temperatur menyebabkan nilai impedansi dari semua sampel semakin menurun. *Complex plane plot* pada temperatur 500 °C menunjukkan nilai impedansinya sangat kecil jika dibandingkan dengan temperatur dibawahnya. Pada temperatur 400 °C pemisahan *semicircle* sangat jelas terlihat dan secara kualitatif mudah untuk dibedakan. Namun, ketika suhu dinaikan *complex plane plot* akan menunjukkan 2 *semicircle*. Analisis ini tidak mudah untuk dijelaskan ketika menentukan nilai resistansi dari masing-masing butir, batas butir dan elektroda.

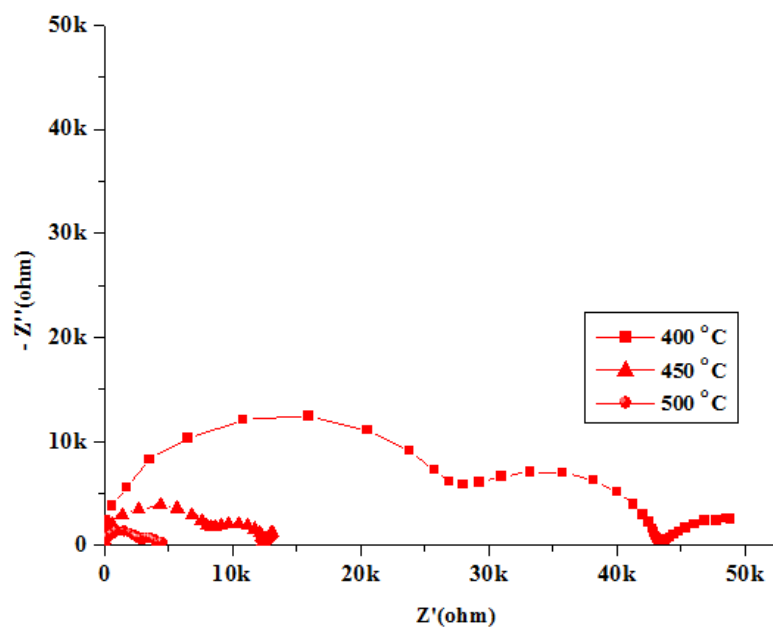
Namun, resistansi batas butir akan berkurang dan akan hilang dari *complex plane plot* akibat dari kenaikan temperatur.



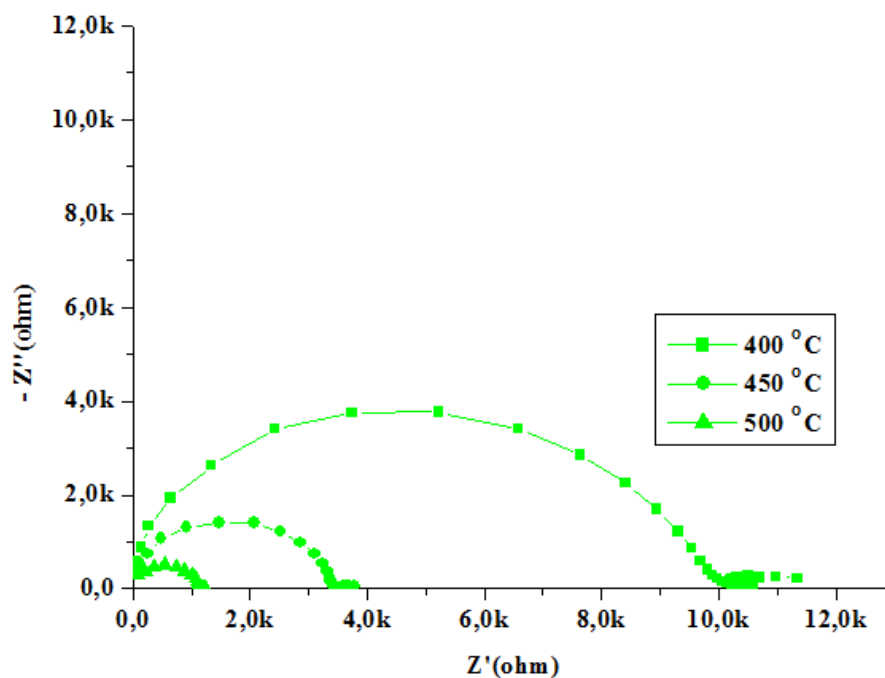
**Gambar 4.23.** Contoh *Complex plane plots* variasi temperatur pada sampel 8YSZ dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz (keterangan:  $k = 1000$ ).



**Gambar 4.24.** Contoh *Complex plane plots* variasi temperatur pada sampel TP dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz (keterangan:  $k = 1000$ ).



**Gambar 4.25.** Contoh *Complex plane plots* variasi temperatur pada sampel P dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz (keterangan: k = 1000).



**Gambar 4.26.** Contoh *Complex plane plots* variasi temperatur pada sampel P+B dari frekuensi 32MHZ-0,1 mHz (keterangan: k = 1000).

#### 4.6.4 Perhitungan nilai resistansi

Nilai resistansi dari sampel tidak secara langsung diperoleh dari pengukuran listrik. Data yang diperoleh hanya nilai impedansi imajiner dan impedansi real. Nilai resistansi dari butir dan batas butir serta nilai kapasitansi ditentukan dengan menggunakan *software Z-View*. *Software* ini merupakan *software* berbayar, sehingga diperlukan pengolahan data listrik menggunakan *software* lain. Salah satu *software* yang dapat digunakan adalah Matlab. Data yang diperoleh dapat diploting dengan Matlab untuk menentukan nilai diameter dari kurva yang terbentuk antara impedansi real dengan impedansi imajiner. Nilai diameter inilah yang digunakan sebagai nilai resistansi dari suatu sampel. Contoh nilai resistansi yang diperoleh ditunjukkan pada Tabel 4.6-4.9 untuk sampel. Nilai resistansi secara lengkap ditampilkan di lampiran D.

**Tabel 4.6.** Nilai resistansi  $R_{\text{butir}}$  dan  $R_{\text{batas butir}}$  8YSZ pada  $T=200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{butir}}$ (ohm)	$R_{\text{batas butir}}$ (ohm)
200	$2,32 \times 10^7$	$3,52 \times 10^7$
250	$2,56 \times 10^6$	$3,28 \times 10^6$
300	$3,70 \times 10^5$	$4,30 \times 10^5$

**Tabel 4.7.** Nilai resistansi  $R_{\text{butir}}$  dan  $R_{\text{batas butir}}$  sampel TP pada  $T=200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{butir}}$ (ohm)	$R_{\text{batas butir}}$ (ohm)
200	$4,46 \times 10^7$	$4,13 \times 10^7$
250	$4,09 \times 10^6$	$3,02 \times 10^6$
300	$5,37 \times 10^5$	$1,13 \times 10^6$

**Tabel 4.8.** Nilai resistansi  $R_{\text{butir}}$  dan  $R_{\text{batas butir}}$  sampel P pada  $T=200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{butir}}$ (ohm)	$R_{\text{batas butir}}$ (ohm)
200	$7,89 \times 10^7$	$1,24 \times 10^8$
250	$6,70 \times 10^6$	$9,45 \times 10^6$
300	$8,75 \times 10^5$	$7,94 \times 10^5$

**Tabel 4.9.** Nilai resistansi  $R_{\text{butir}}$  dan  $R_{\text{batas butir}}$  sampel P+B pada  $T=200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$ 

Temperatur ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{butir}}$ (ohm)	$R_{\text{batas butir}}$ (ohm)
200	$2,13 \times 10^7$	$1,07 \times 10^7$
250	$1,85 \times 10^6$	$2,60 \times 10^6$
300	$1,69 \times 10^5$	$3,38 \times 10^5$

Nilai Resistansi untuk semua sampel semakin menurun dengan adanya kenaikan temperatur. Nilai R yang semakin menurun dikarenakan pembawa muatan telah bergerak. Ketika temperatur dinaikan maka pergerakan pembawa muatan yaitu vakansi oksigen semakin cepat, sehingga sampel semakin konduktif. Nilai resistansi pada temperatur rendah sangat besar, hal ini disebabkan vakansi oksigen yang belum bergerak. Energi panas yang diperoleh dari temperatur  $100\text{ }^{\circ}\text{C}$  belum cukup untuk menggerakkan vakansi ini untuk bergerak dari satu butir ke butir yang lainnya. Vakansi oksigen timbul karena adanya dopan yang diberikan pada sampel  $\text{CeO}_2$  membentuk  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$ . Reaksi defeknya adalah sebagai berikut:



Sedangkan vakansi oksigen yang terdapat pada sampel 8YSZ akibat dopan yang diberikan ( $\text{Y}_2\text{O}_3$ ) dapat dituliskan sebagai berikut:



Setiap 2 atom Yb menggantikan 1 atom Ce akan timbul 1 vakansi oksigen. Begitu juga dengan 8YSZ, Setiap 2 atom Y menggantikan 1 atom Zr akan timbul 1 vakansi oksigen. Vakansi oksigen inilah yang memainkan peranan penting pada konduktivitas listrik. Nilai resistansi pada butir menunjukkan pada mudah tidaknya vakansi elektron untuk bergerak sedangkan nilai resistansi pada batas butir menunjukkan besarnya potensial penghalang untuk vakansi oksigen melompat dari satu butir ke butir yang lain. Pada temperatur  $200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$  Pelet P+B memiliki nilai resistansi butir yang lebih kecil dibandingkan semua sampel. Resistansi yang kecil diduga kuat karena adanya kehadiran  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Kehadiran  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mengakibatkan timbulnya fasa sekunder (ditunjukkan dengan pola XRD pada Gambar 4.11). Penambahan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  pada sampel P yang *single phase* membuat sampel P semakin *dense*, hal ini dibuktikan dengan pengujian densitas melalui metode Archimedes

(Tabel 4.8). Ketika sampel semakin *dense*, maka resistansinya semakin berkurang. Semakin berkurangnya resistansi mengakibatkan vakansi oksigen mudah untuk bergerak.

Sampel 8YSZ memiliki resistansi yang besar (200-300 °C) dibandingkan dengan sampel P+B dikarenakan vakansi oksigen belum berperan penting didalam butir. Energi yang diperoleh dari temperatur 200-300 °C belum cukup untuk menggerakkan vakansi oksigen. Vakansi oksigen mulai berperan penting terjadi pada temperatur 400-850 °C. Perbedaan vakansi oksigen yang mulai aktif pada temperatur tertentu merupakan karakteristik dari sampel. Contoh resistansi dari semua sampel pada T= 400 °C dan 450 °C. Berikut disajikan pada Tabel 4.10.

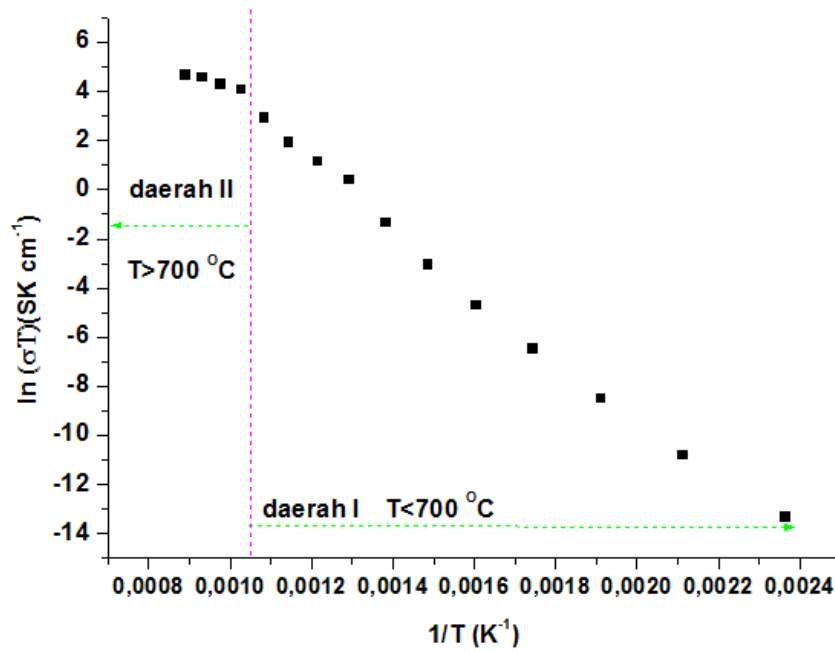
**Tabel 4.10.** Nilai resistansi dari semua sampel pada T= 400 °C dan T=450 °C

Sampel	T = 400 °C	T= 450 °C
	R <sub>butir</sub> (ohm)	R <sub>butir</sub> (ohm)
8YSZ	$2,71 \times 10^3$	$5,15 \times 10^2$
TP	$4,21 \times 10^3$	$1,31 \times 10^3$
P	$8,81 \times 10^3$	$2,82 \times 10^3$
P+B	$3,57 \times 10^3$	$1,19 \times 10^3$

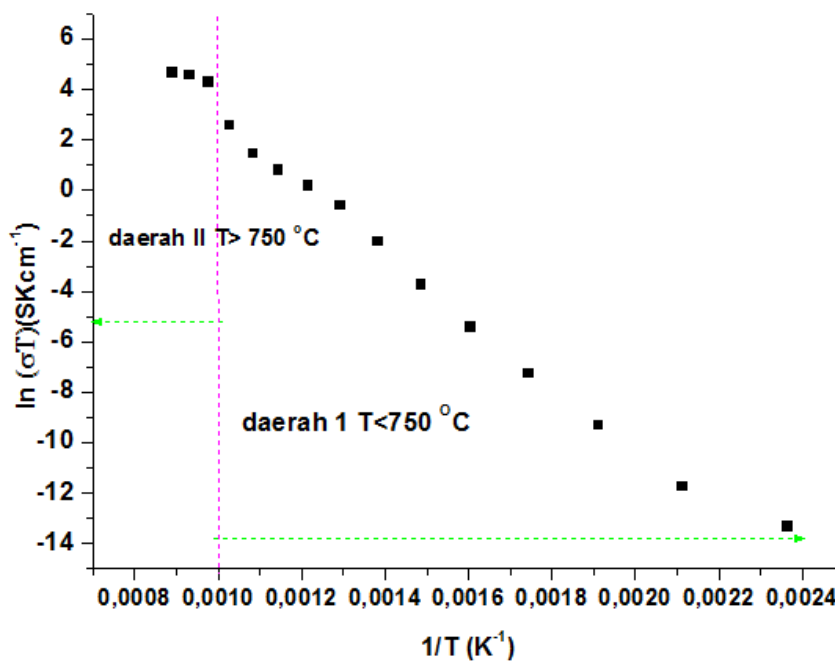
#### 4.6.5 Perhitungan Nilai Konduktivitas

##### 4.6.5.1 Perhitungan Nilai Konduktivitas Serbuk ZrO<sub>2</sub> yang didoping Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>

Hubungan antara temperatur  $1/T$  dengan  $\ln(\sigma T)$  pada sampel 8YSZ disajikan pada Gambar 4.27-4.28. Penggolongan daerah pada Gambar 4.27 dan 4.28 dibagi berdasarkan pada kecenderungan kemiringan garis. Plot Konduktivitas butir menunjukkan pembagian dua daerah. Daerah I merupakan daerah dimana  $T < 700$  °C sedangkan daerah II merupakan daerah dimana  $T > 700$  °C. Sedangkan Plot konduktivitas butir dan batas butir menunjukkan dua daerah dengan pembagian yang berbeda dengan plot konduktivitas butir. Daerah I merupakan daerah dimana  $T < 750$  °C sedangkan daerah II merupakan daerah dimana  $T > 750$  °C. Daerah 1 merupakan daerah yang cenderung resistif sedangkan daerah 2 merupakan daerah yang cenderung konduktif.



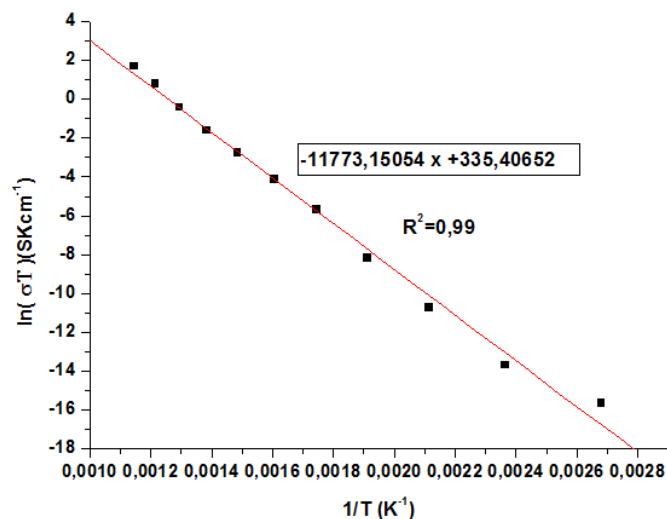
**Gambar 4.27.** Hubungan antara temperatur ( $1/T$ ) dengan  $\ln(\sigma T)$  pada sampel 8YSZ untuk butir.



**Gambar 4.28.** Hubungan antara temperatur ( $1/T$ ) dengan  $\ln(\sigma T)$  pada sampel 8YSZ untuk butir dan batas butir.



Contoh nilai regresi linier untuk sampel 8YSZ pada temperatur <700 °C. Hasilnya ditunjukkan pada Gambar 4.29. Nilai regresi linier digunakan untuk mendapatkan energi aktivasi. Perhitungan energi aktivasi berada dilampiran E.



**Gambar 4.29.** Hubungan antara temperatur ( $1/T$ ) dengan  $\ln(\sigma T)$  pada sampel 8YSZ  $T < 750$  °C

Nilai energi aktivasi untuk masing-masing daerah ditunjukkan pada Tabel 4.11 dan 4.12.

**Tabel 4.11.** Nilai Energi aktivasi butir untuk sampel 8YSZ pada 2 daerah

Pelet	Daerah 1 $T < 700$ °C	Daerah 2 $T > 700$ °C
8YSZ	$1,12 \pm 0,02$	$0,38 \pm 0,05$

**Tabel 4.12.** Nilai Energi aktivasi butir+batas butir untuk sampel 8YSZ

Pelet	Daerah 1 $T < 750$ °C	Daerah 2 $T > 750$ °C
8YSZ	$1,07 \pm 0,03$	$0,37 \pm 0,11$

Energi aktivasi yang dimiliki oleh sampel 8YSZ berbeda-beda untuk setiap daerah. Perbedaan besar kecilnya energi aktivasi ini disebabkan karena faktor temperatur yang diberikan, interaksi elektrosatik antara  $Y'_{Zr}$  dengan  $V''_O$ , disosiasi defek pasangan dan migrasi vakansi oksigen. Badwal (1992) telah melakukan

penelitian dan melaporkan bahwa perubahan kemiringan dari plot Arrhenius terjadi ketika temperatur dinaikan akan mengakibatkan terjadinya penurunan energi aktivasi. Interaksi elektrosatik pertama kali antara  $Y'_{Zr}$  dengan  $V''_O$  terjadi pada temperatur rendah sehingga pada temperatur rendah membutuhkan energi pengaktifan yang besar agar tercipta pasangan interaksi elektrostatik. Sedangkan migrasi vakansi berhubungan dengan pergerakan vakansi oksigen dari satu butir ke butir yang lain. Pada daerah 1 diperlukan energi aktivasi yang besar untuk menggerakkan vakansi oksigen, yang semula dalam keadaan diam/bergetar ditempat. Sedangkan untuk daerah 2, nilai energi aktivasi jauh lebih rendah dibandingkan dengan daerah 1. Rendahnya energi aktivasi pada daerah 2 disebabkan karena pada daerah 1 vakansi oksigen sudah teraktivasi sehingga untuk menggerakkan vakansi oksigen di daerah 2 tidak membutuhkan energi yang lebih tinggi dari daerah 1.

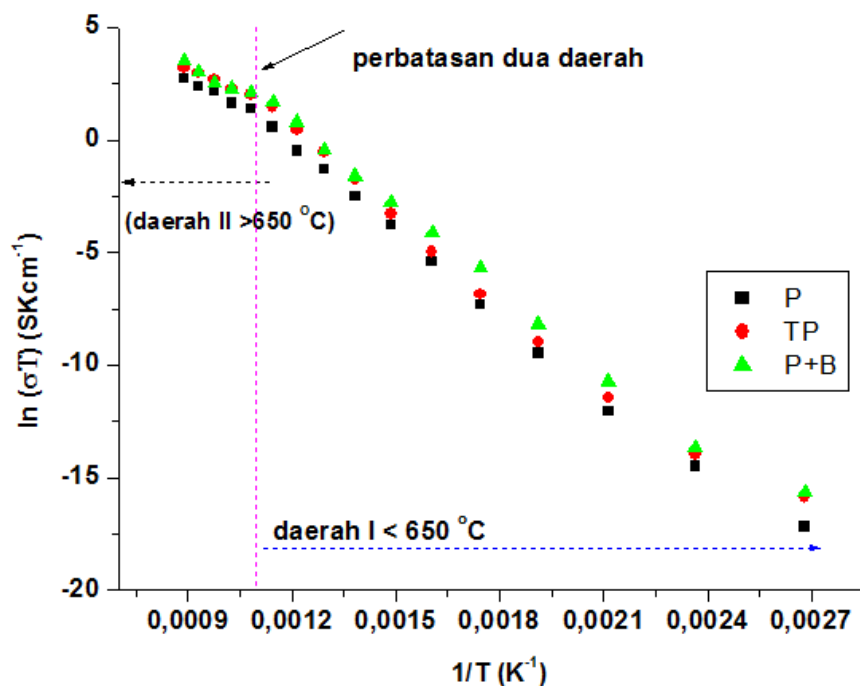
Berdasarkan Gambar 4.27 dan 4.28 konduktivitas pada daerah 1 memiliki nilai yang rendah, hal ini disebabkan oleh mobilitas vakansi oksigen yang masih rendah akibat temperatur yang masih rendah. Mobilitas vakansi oksigen nilainya berbanding lurus dengan temperatur. Semakin tinggi temperatur yang diberikan maka mobilitas elektron yang bergerak dari satu butir ke butir yang lain semakin banyak sehingga konduktivitas listriknya semakin tinggi. Konduktivitas butir sampel 8YSZ pada  $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai  $0,0909\text{ S/cm}$ . Nilai konduktivitas butir tersebut jauh lebih tinggi dari sampel NK, K dan P+B. Yang et al (2016) melaporkan sampel  $\text{Ce}_{0.8}\text{Y}_{0.18}\text{M}_{0.02}\text{O}_{2-\delta}$  dengan  $M = \text{Ca, Sr, Fe, L}$  memiliki konduktivitas listrik  $\sigma = 0,057\text{ S/cm}$ . Walaupun sampel 8YSZ tidak menggunakan *co-doped* seperti yang dilakukan oleh Yang et al (2016), terlihat bahwa konduktivitas listriknya jauh lebih tinggi.

Konduktivitas total sampel dari suatu bahan merupakan jumlahan keseluruhan dari konduktivitas butir dan konduktivitas batas butir. Berdasarkan Tabel 4.17 nilai energi aktivasi dari butir+batas butir memiliki nilai energi aktivasi yang rendah. Turunnya energi aktivasi pada butir+batas butir jika dibandingkan dengan konduktivitas butir disebabkan karena peranan konduktivitas pada batas butir. Konduktivitas total cenderung lebih konduktif pada temperatur tinggi (Gambar 4.33). Terdapat 3 temperatur yang memiliki nilai konduktivitas yang

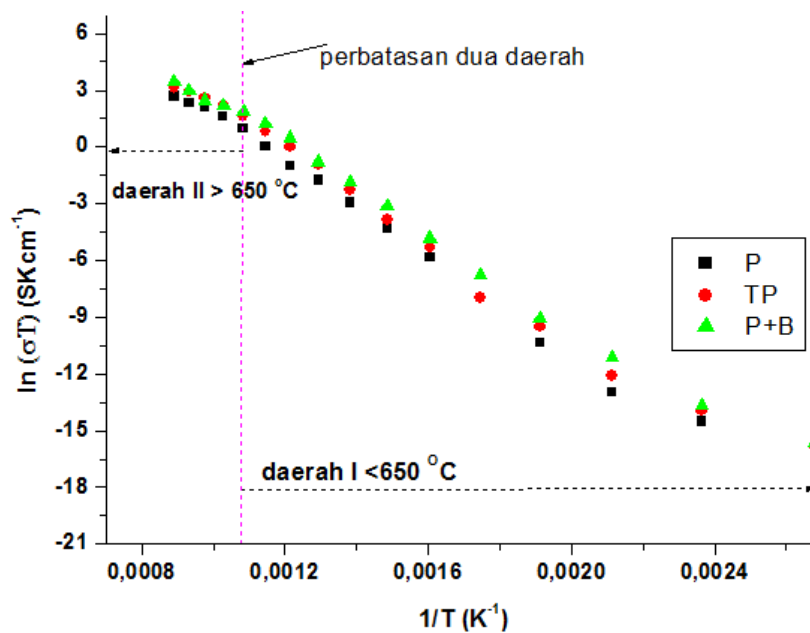
tinggi pada daerah 2 yaitu temperatur 750 °C, 800 °C dan 850 °C. Sampel 8YSZ memiliki konduktivitas yang tinggi jika dibandingkan dengan sampel TP, P, P+PB pada  $T=450-850$  °C. Tingginya konduktivitas tersebut disebabkan karena densitas relatif yang dimiliki sampel 8 YSZ tinggi (96,70%). Tingginya densitas yang dimiliki sampel 8YSZ memungkinkan vakansi oksigen lebih mudah bergerak dari satu butir ke butir yang lain. Jika vakansi oksigen mudah untuk bergerak maka mobilitas vakansi oksigen menjadi banyak sehingga konduktivitas ioniknya menjadi tinggi.

#### 4.6.5.2 Perhitungan Nilai Konduktivitas 20YBDC

Hubungan antara temperatur  $1/T$  dan  $\ln(\sigma T)$  pada sampel 20 YBDC disajikan pada Gambar 4.30-4.31. Regresi linier yang dibuat dibagi menjadi 2 berdasarkan kecenderungan slope dari masing-masing sampel. Daerah 1 adalah daerah  $T < 650$  °C dan daerah 2 adalah daerah  $T > 650$  °C. Perbedaan kecenderungan slope tersebut disebabkan karena nilai resistansi dari temperatur 650-850 °C nilainya cenderung konduktif sedangkan temperatur 100 -650 °C cenderung resistif.



**Gambar 4.30.** Hubungan antara temperatur ( $1/T$ ) dengan  $\ln(\sigma T)$  pada semua sampel untuk butir



**Gambar 4.31.** Hubungan antara temperatur ( $1/T$ ) dengan  $\ln(\sigma T)$  pada semua sampel untuk butir+batas butir

Nilai energi aktivasi untuk semua daerah dari semua pelet ditunjukkan pada Tabel 4.13 dan 4.14

**Tabel 4.13.** Nilai Energi aktivasi butir untuk masing-masing sampel pada dua daerah

Pelet	Ea $T < 650$ °C (eV)	Ea $T > 650$ °C (eV)
TP	$1,02 \pm 0,04$	$0,54 \pm 0,03$
P	$1,03 \pm 0,03$	$0,61 \pm 0,04$
P+B	$1,01 \pm 0,03$	$0,64 \pm 0,10$

**Tabel 4.14.** Nilai Energi aktivasi butir+batas butir untuk masing-masing sampel pada dua daerah

Pelet	Ea, $T < 650$ °C (eV)	Ea, $T > 650$ °C (eV)
TP	$1,00 \pm 0,05$	$0,67 \pm 0,05$
P	$1,01 \pm 0,04$	$0,76 \pm 0,06$
P+B	$0,99 \pm 0,03$	$0,70 \pm 0,09$

Berdasarkan Tabel 4.13 dapat dilihat bahwa pelet P memiliki energi aktivasi  $1,03 \pm 0,03$  eV sedangkan pelet P+B memiliki energi aktivasi  $1,01 \pm 0,03$  eV, terjadi pengurangan energi aktivasi sebesar 0,02 eV. Telah diketahui sebelumnya, pelet P merupakan pelet yang berasal dari serbuk yang dipanaskan dan memiliki fasa tunggal sedangkan pelet P+B berasal dari serbuk yang dipanaskan, memiliki fasa tunggal dan ditambahkan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$ . Dengan demikian, pengaruh 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  adalah menurunkan energi aktivasi butir. Turunnya energi aktivasi butir akibat penambahan  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  sangat menguntungkan untuk sistem SOFC karena tidak membutuhkan energi yang tinggi untuk menggerakkan vakansi oksigen dari satu butir ke butir yang lainnya. Energi aktivasi butir yang rendah menyebabkan vakansi oksigen akan lebih mudah bergerak sehingga konduktivitasnya semakin tinggi (Shyam Kumar dan Bauri, 2014). Selain dari itu, sampel P+B memiliki energi aktivasi yang rendah untuk daerah 1. Rendahnya energi aktivasi yang dimiliki oleh sampel P+B diduga kuat karena adanya peranaan fasa sekunder  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  yang beroperasi pada temperatur dibawah  $T < 650$  °C. Namun ketika  $T > 650$  °C, fasa  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  mulai tidak stabil karena  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mulai mendekati titik lelehnya sehingga nilai energi aktivasinya cenderung naik dan paling tinggi diantara semua pelet. Selain dari itu, tingginya energi aktivasi ini disebabkan oleh kehadiran struktur baru yang mulai berperan penting yaitu  $\text{CeO}_2$  murni kubik.  $\text{CeO}_2$  murni kubik adalah  $\text{CeO}_2$  tanpa doping yang bersifat sebagai konduktor ionik yang buruk ( $\sigma = 2,41 \times 10^{-4}$  S/cm) (Fergus et al., 2008)(Fu et al., 2008) sehingga energi aktivasinya kembali meningkat. Peningkatan energi aktivasi disebabkan oleh energi ikat vakansi oksigen yang meningkat. Energi vakansi oksigen yang meningkat disebabkan oleh gaya elektrostatis dan energi relaksasi kisi (Fergus et al., 2008), ini ditunjukkan dengan pola XRD yang pecah di bidang kristal yang sama namun  $2\theta$  yang berbeda.

Energi aktivasi butir pada daerah 2 lebih rendah dibandingkan energi aktivasi pada daerah 1. Rendahnya energi aktivasi pada daerah 2 disebabkan karena vakansi oksigen sudah teraktivasi pada daerah 1 sehingga untuk bergerak tidak membutuhkan energi aktivasi yang besar. Selain dari itu, pada daerah 2 terjadi pada temperatur yang relatif tinggi sehingga vakansi oksigen lebih mudah untuk bergerak.

Konduktivitas butir pada  $T=800\text{ }^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai  $0,009\text{ S/cm}$  untuk sampel P,  $0,017\text{ S/cm}$  untuk sampel TP dan  $0,018\text{ S/cm}$  untuk sampel P+B. Nilai konduktivitas ini berada pada rentang konduktivitas untuk elektrolit SOFC ( $10^{-5}$ - $10^1$ ). Yang et al (2016) melaporkan sampel  $\text{Ce}_{0,8}\text{Y}_{0,18}\text{M}_{0,02}\text{O}_{2-\delta}$  dengan  $\text{M} = \text{Ca}, \text{Sr}, \text{Fe}, \text{L}$  memiliki konduktivitas listrik  $\sigma = 0,057\text{ S/cm}$ . Nilai konduktivitas yang diperoleh Yang et al (2016) sangat tinggi disebabkan karena nilai densitasnya yang tinggi  $>90\%$  dan menggunakan dopan aliovalen yang bermacam-macam sehingga vakansi oksigen yang ada jauh lebih banyak. Jika dibandingkan dengan penelitian lainnya pada  $T$  yang lebih rendah, diperoleh analisa sebagai berikut. Konduktivitas butir pada  $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$  memiliki nilai  $5 \times 10^{-3}\text{ S/cm}$  untuk sampel P,  $1 \times 10^{-2}\text{ S/cm}$  untuk sampel TP dan  $1,2 \times 10^{-2}\text{ S/cm}$  untuk sampel P+B. Penelitian sebelumnya telah melaporkan konduktivitas listrik pada  $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$  untuk beberapa sampel. Fu et al (2008) melaporkan sampel  $\text{Ce}_{0,8}(\text{Gd}_{1-x}\text{Bi}_x)_{0,2}\text{O}_{1,9}$  dengan  $x=0,1$  memiliki konduktivitas listrik  $1,98 \times 10^{-2}\text{ S/cm}$ , Kazlauskas et al (2012) melaporkan bahan  $\text{Ce}_{0,9}\text{Gd}_{0,1}\text{O}_{1,95}$  memiliki konduktivitas listrik  $3,3 \times 10^{-3}\text{ S/cm}$ . Jadi, nilai konduktivitas dari semua sampel yang dimiliki pada penelitian ini, masih berada pada rentang konduktivitas listrik SOFC dan nilainya tidak jauh berbeda dari penelitian-penelitian sebelumnya.

Konduktivitas total yaitu konduktivitas dari suatu bahan dengan menjumlahkan konduktivitas butir dan konduktivitas batas butir. Sebelum menjelaskan konduktivitas butir akan dijelaskan terlebih dahulu definisi butir dan batas butir. Butir merupakan kumpulan bidang kristal dengan arah orientasi yang sama sedangkan batas butir merupakan kumpulan bidang kristal dengan arah orientasi yang berbeda. Konduktivitas butir untuk bahan yang sama cenderung memiliki nilai yang sama karena tersusun dari bahan yang sama dan relatif nilainya tidak jauh berbeda. Begitu juga dengan jumlahan vakansi dan peranan vakansi, bahan yang sama akan memiliki jumlahan vakansi yang sama, gambaran konduktivitas butir bisa dilihat pada Gambar 4.30. Konduktivitas dari batas butir tergantung dari beberapa faktor, salah satu yang mempengaruhi adalah porositas. Ketika porositasnya tinggi maka vakansi oksigen tidak bisa lewat karena terhalangi potensial penghalang.

## **LAMPIRAN A**

### **PERHITUNGAN PERSENTASE MASSA**

#### **1.1 Perhitungan Persentase 8 mol % YSZ**

Massa  $\text{ZrO}_2$  = 12,3224 gram

Massa  $\text{Y}_2\text{O}_3$  = 1,9635 gram

#### **1.2 Persentase Massa /Berat**

Massa  $\text{CeO}_2$  = 13,7694 gram

Massa  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  = 3,9408

#### **1.3 Pencampuran dengan Co-Firing**

Massa  $\text{Yb}_{0,2}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  = 2,17 gram

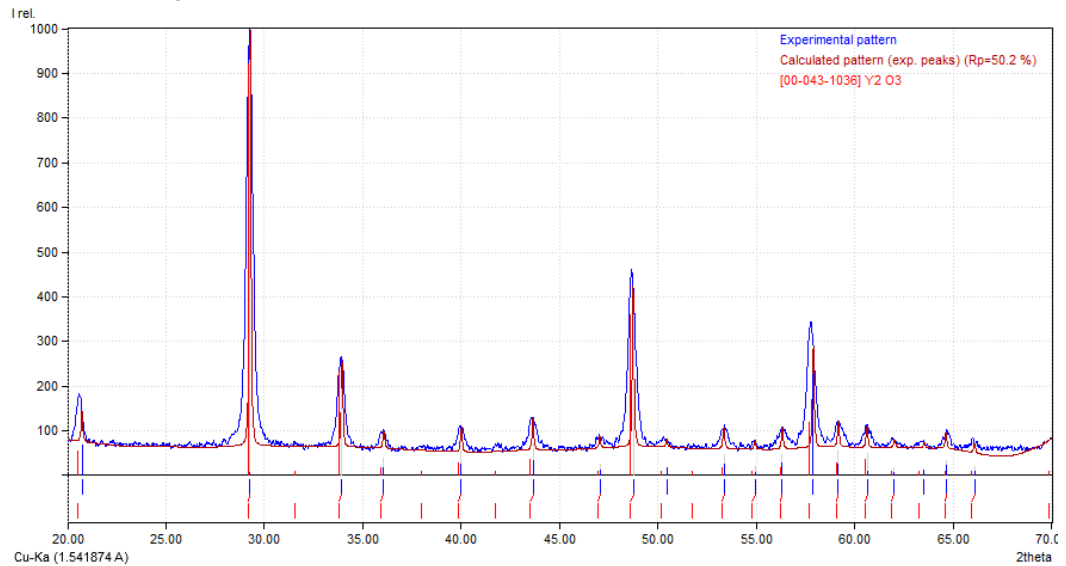
Massa  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  = 0,237 gram

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

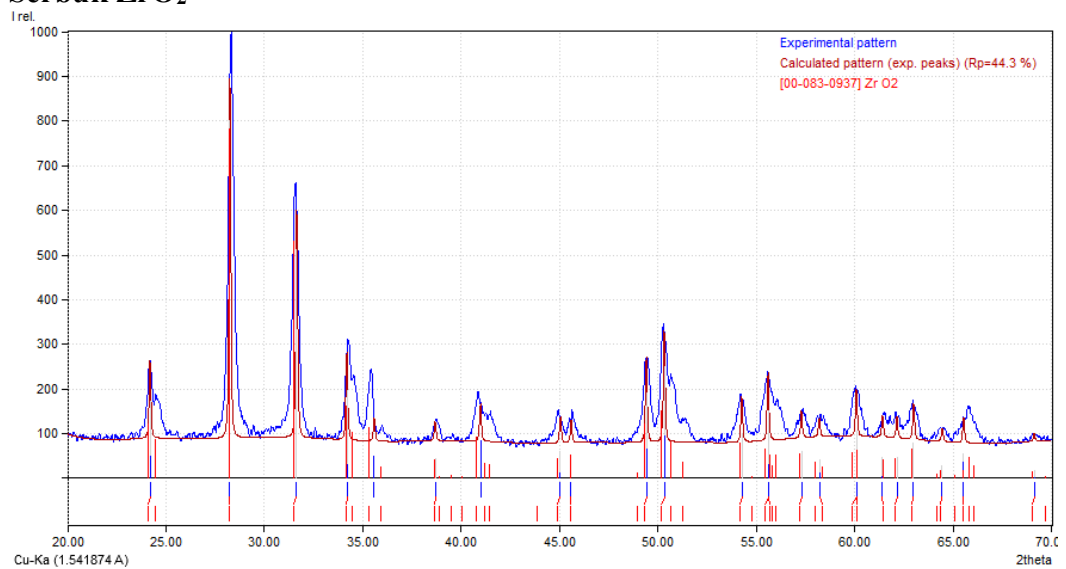


**LAMPIRAN B**  
**HASIL ANALISIS KUALITATIF DENGAN SOFTWARE MATCH!**

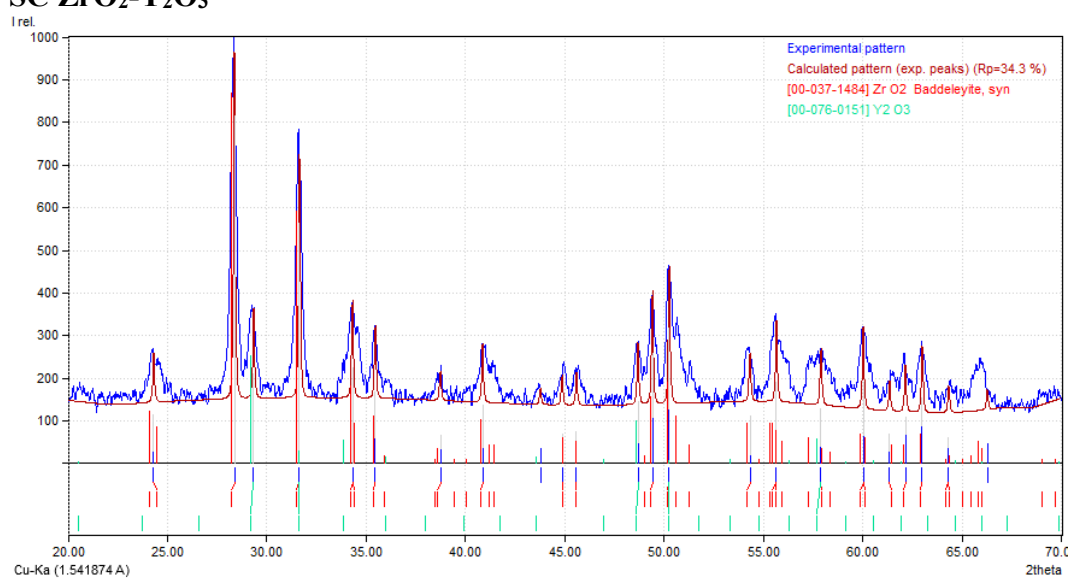
**Serbuk  $\text{Y}_2\text{O}_3$**



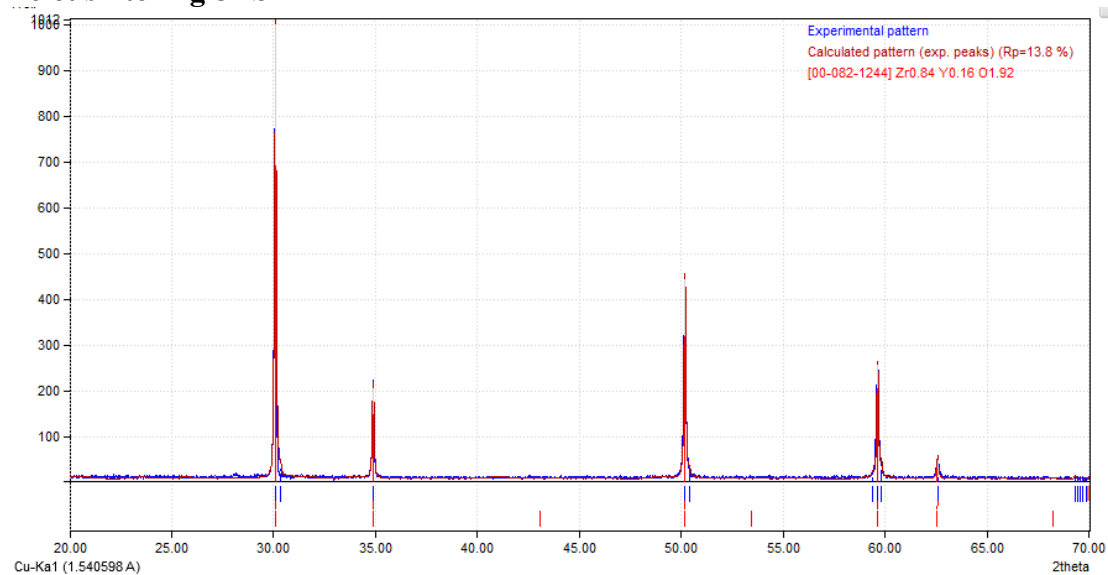
**Serbuk  $\text{ZrO}_2$**



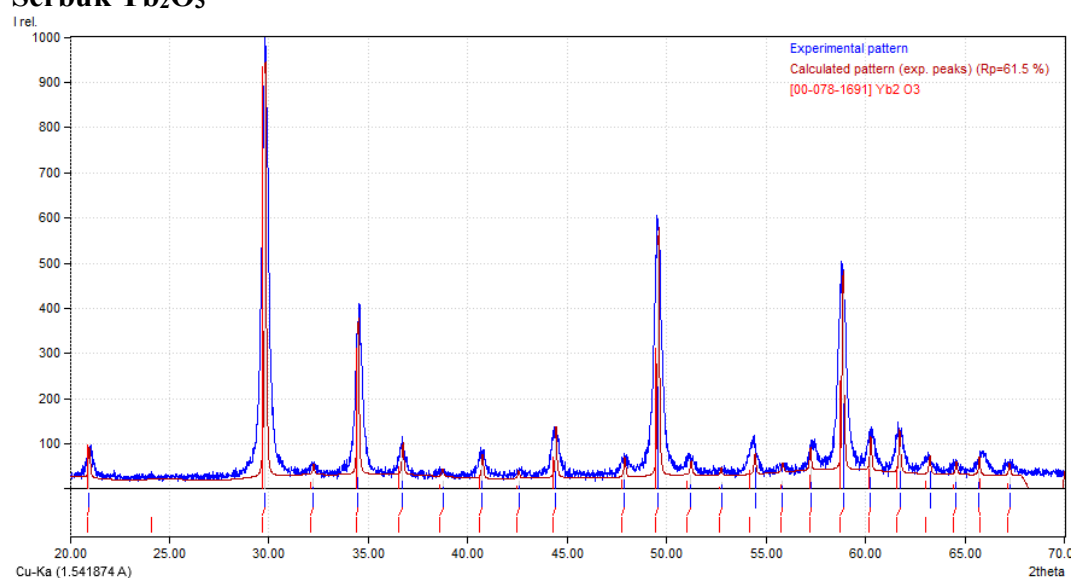
## SC ZrO<sub>2</sub>-Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>



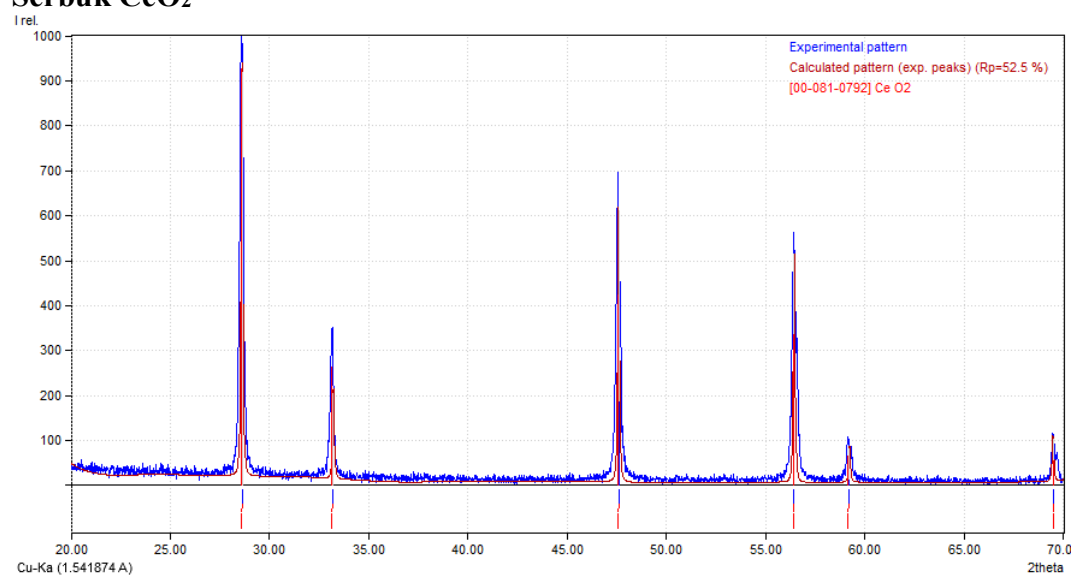
## Pelet sintering 8YSZ



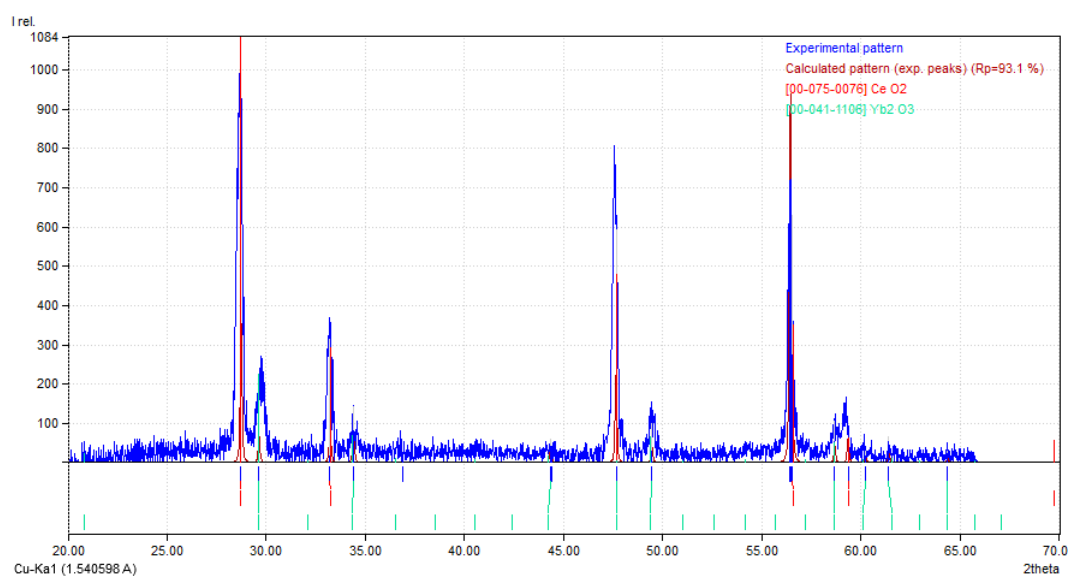
## Serbuk $\text{Yb}_2\text{O}_3$



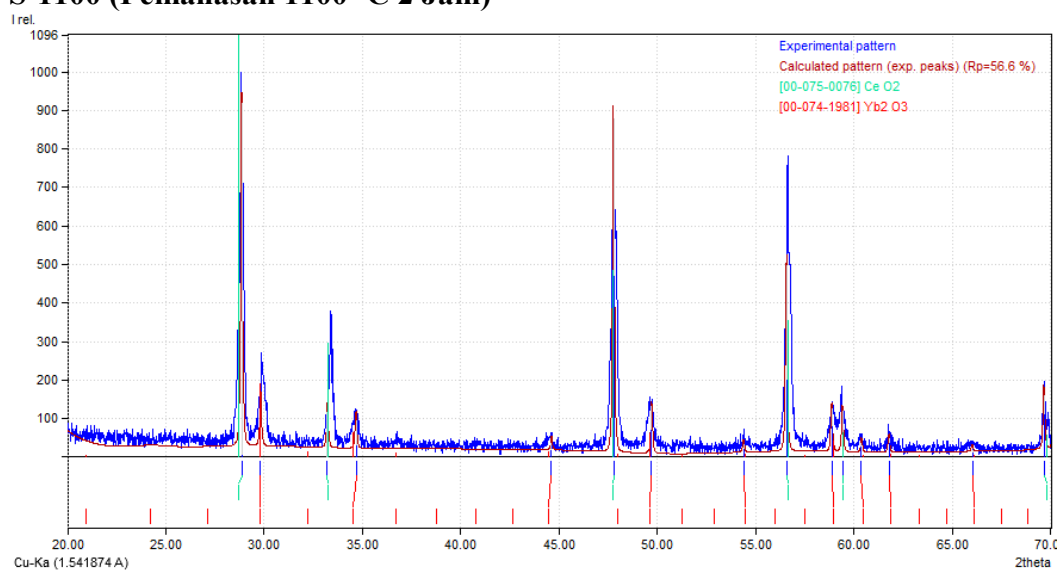
## Serbuk $\text{CeO}_2$



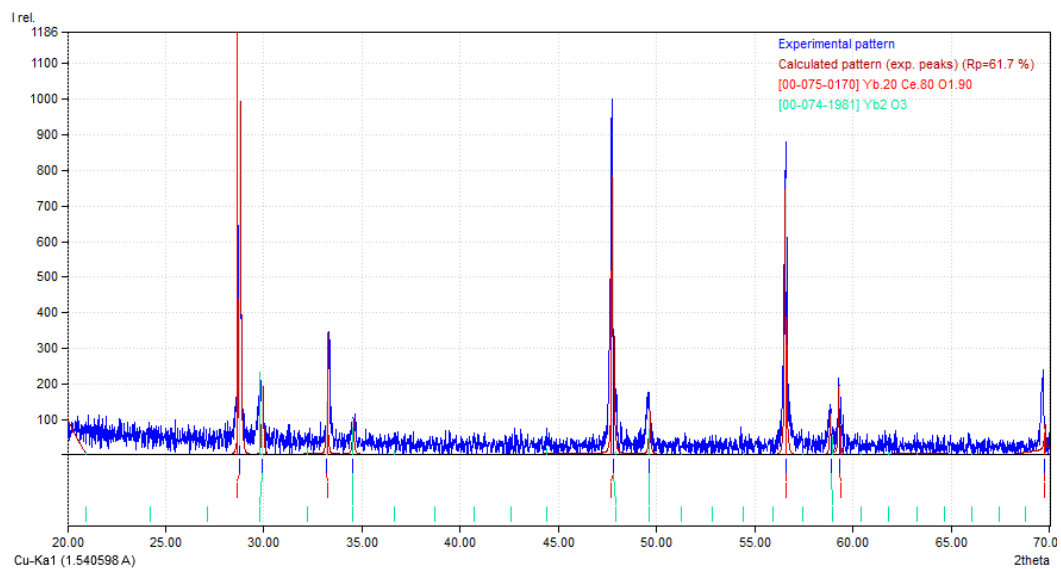
## SC (Serbuk campuran)



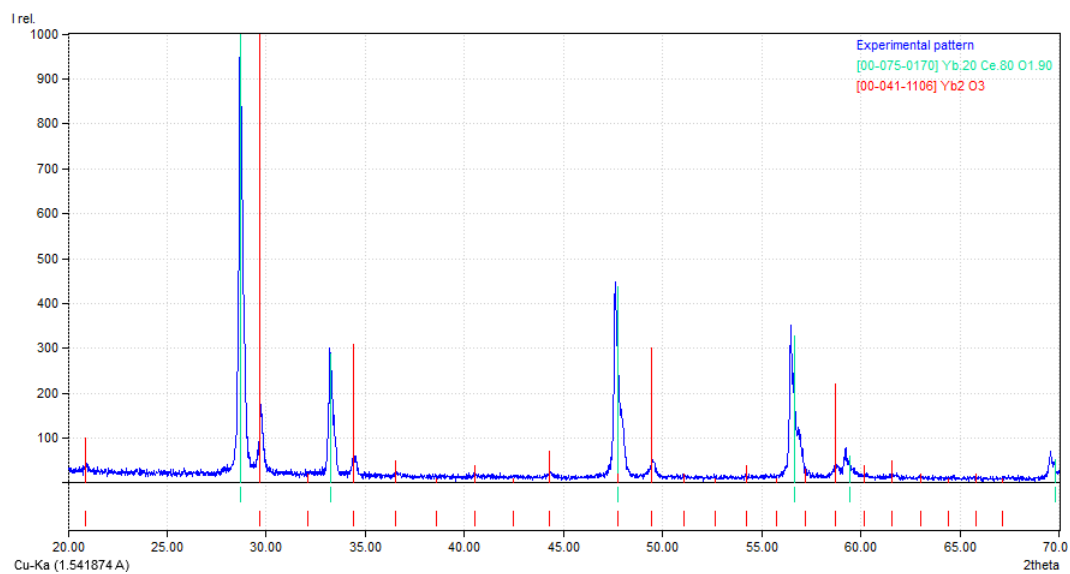
## S-1100 (Pemanasan 1100 °C 2 Jam)



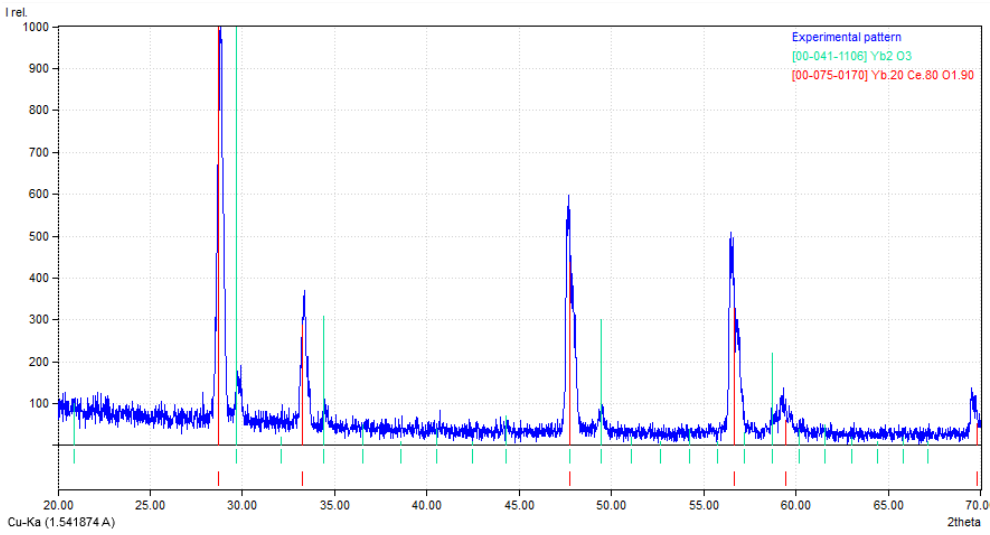
### S-1200 (Pemanasan 1200 °C 2 Jam)



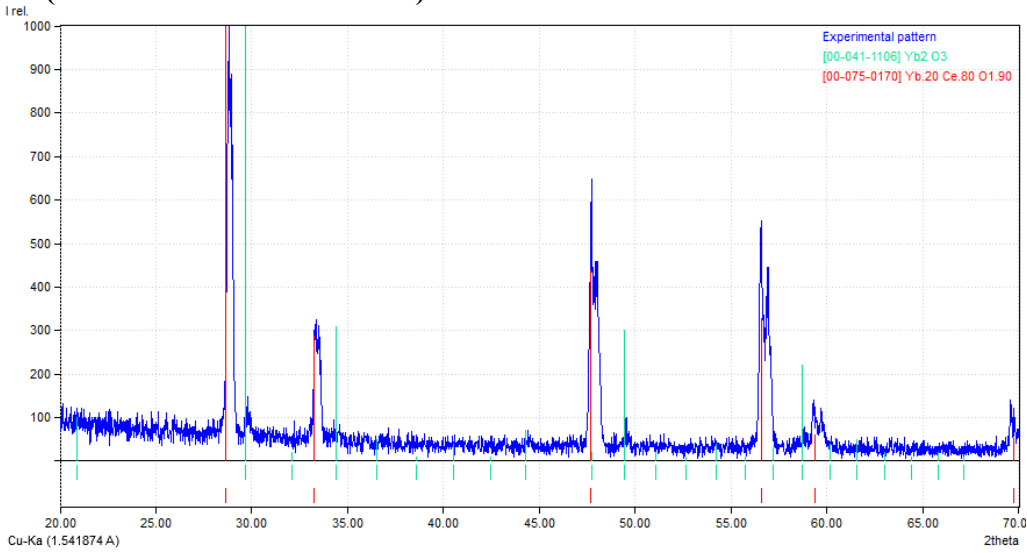
### S2 (Pemanasan 1350 °C 2 Jam)



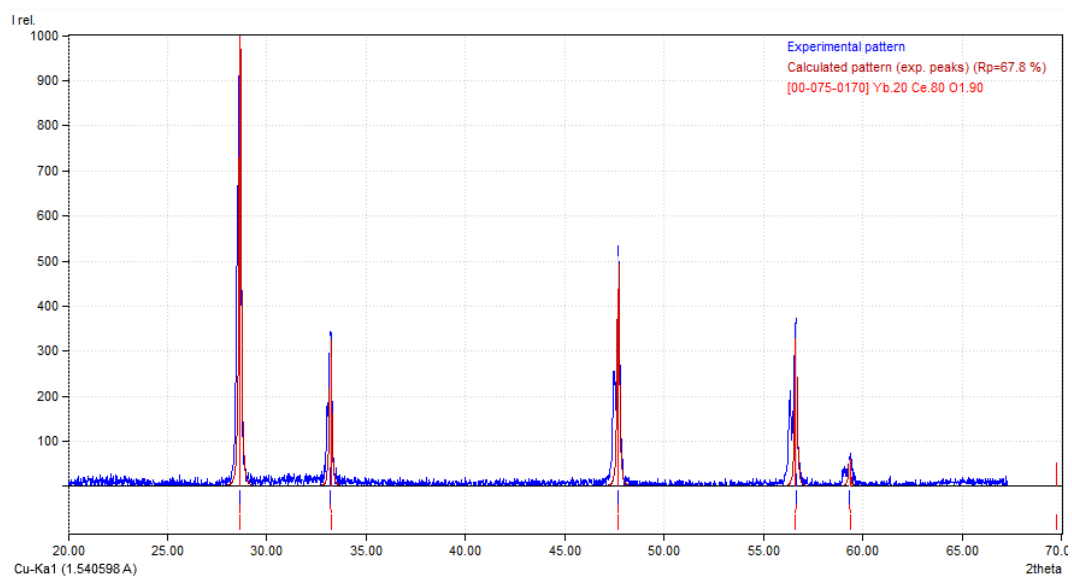
**S4 (Pemanasan 1350 °C 4 Jam)**



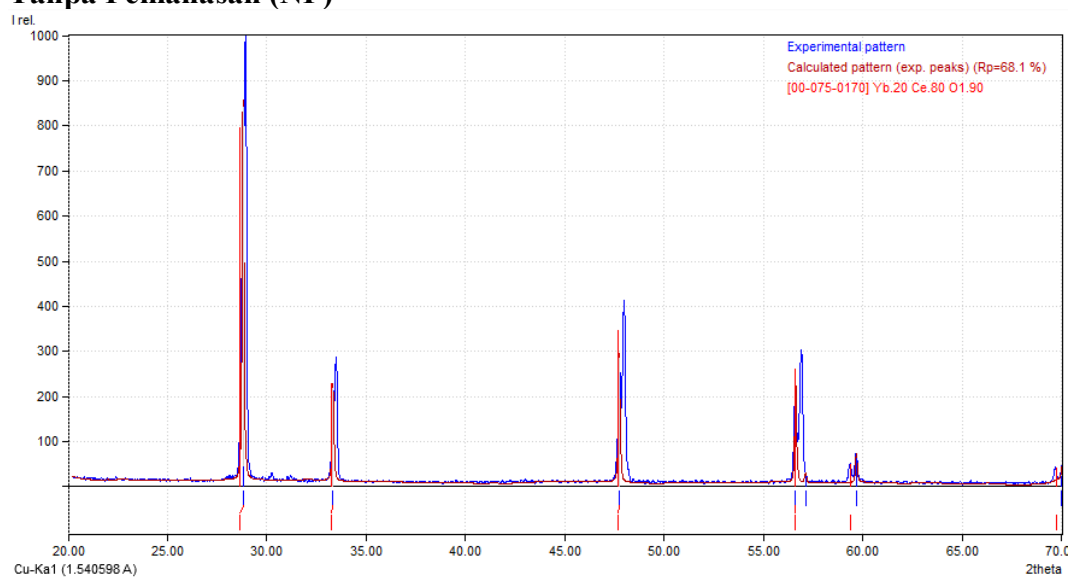
**S8 (Pemanasan 1350 °C 8 Jam)**



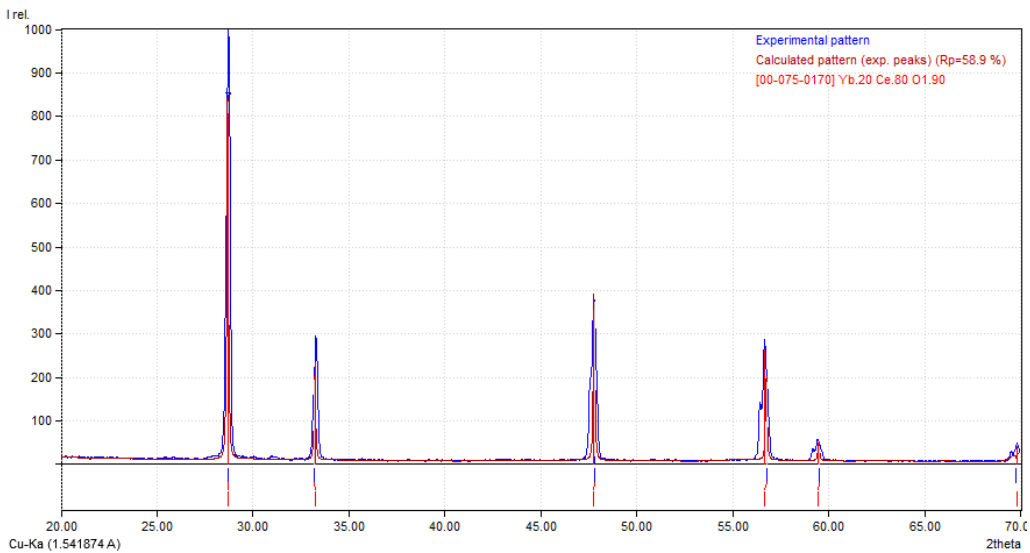
### S16 (Pemanasan 1350 °C 16 Jam)



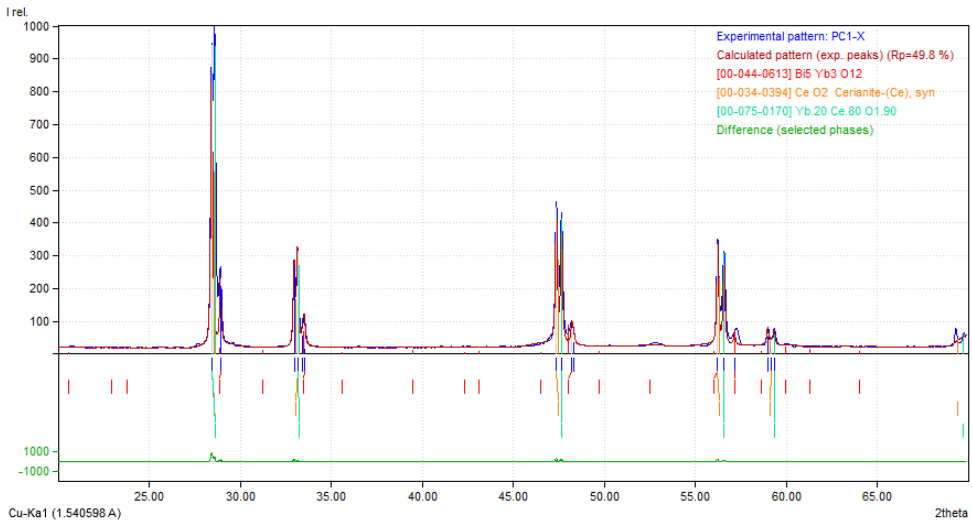
### Tanpa Pemanasan (NP)



Dengan Pemanasan (P)



P+B





## LAMPIRAN C REKSPITULASI HASIL REFINMENT

**Tabel C.1 Nilai FOM variasi kenaikan tempeartur**

No	Parameter	S-1100	S-1200	S-1300
1	R <sub>p</sub>	16.01	17.93	16.50
2	R <sub>wp</sub>	21.36	24.57	20.88
3	GoF	1.358	1.38	2.54
3	R <sub>B</sub>			
	Phase 1	2.28	2,21	3.35
	Phase 2	4.86	5.99	4.86
4	Parameter Kisi			
	Phase 1	5.340500	5.336774	5.330885
	Phase 2	10.301234	10.297015	10.298717
5	Persentase Berat			
	CeO <sub>2</sub>	76.20±3.07	80.19±7.75	87.89±2.95
	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	23.80±1.63	19.81±2.14	12.11±1.01
6	Persentase Mol			
	CeO <sub>2</sub>	87.59±3.53	90.97±9.14	94.12±3.15
	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.41±0.85	9.03±1.01	5.88±0.49

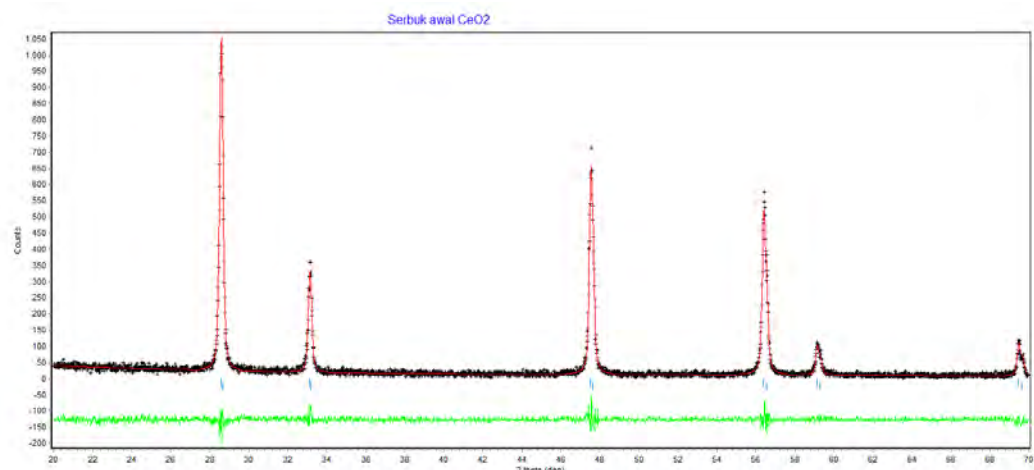
**Tabel C.2 Nilai FOM untuk variasi waktu untuk S2, S4 dan S8.**

No	Parameter	S2	S4	S8	S16
1	R <sub>p</sub>	16.50	18.82	20.08	15.27
2	R <sub>wp</sub>	20.88	24.96	25.87	19.47
3	GoF	2.54	1.60	1.61	1.75
3	R <sub>B</sub>				
	Phase 1	3.35	4.25	5.38	3.19
	Phase 2	4.86	7.07	7.34	-
4	Parameter Kisi				
	Phase 1	5.330885	5.338933	5.324202	5.316075
	Phase 2	10.298717	10.326385	10.30740	-
5	Persentase Berat				
	CeO <sub>2</sub>	87.89±2.95	96.15±4.76	98.40±5.25	100
	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.11±1.01	3.85±0.36	1.60±1.40	-
6	Persentase Mol				
	CeO <sub>2</sub>	94.12±3.15	96.65±4.79	98.16±5.23	100
	Yb <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5.88±0.49	3.35±0.31	1.84±0.46	-

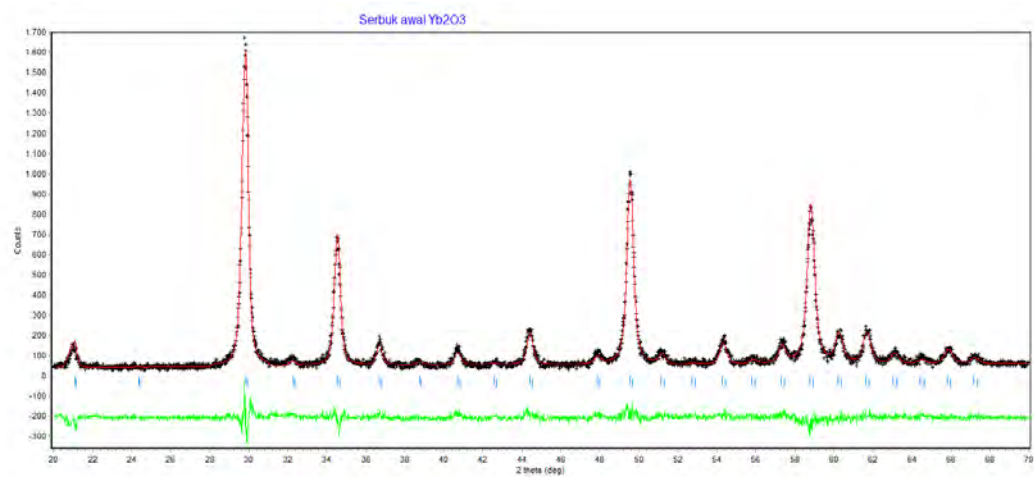
**Tabel C.3 Nilai FOM dan nilai parameter kisi untuk sinterring pada variasi sampel**

No	Parameter	8YSZ	P	TP
1	$R_p$	9,212	13,68	15,14
2	$R_{wp}$	2,152	17,43	18,89
3	GoF	3,095	2,35	3,08
3	$R_B$	2,21	2,51	3,68
4	Parameter Kisi	5,14	5,39	5,32

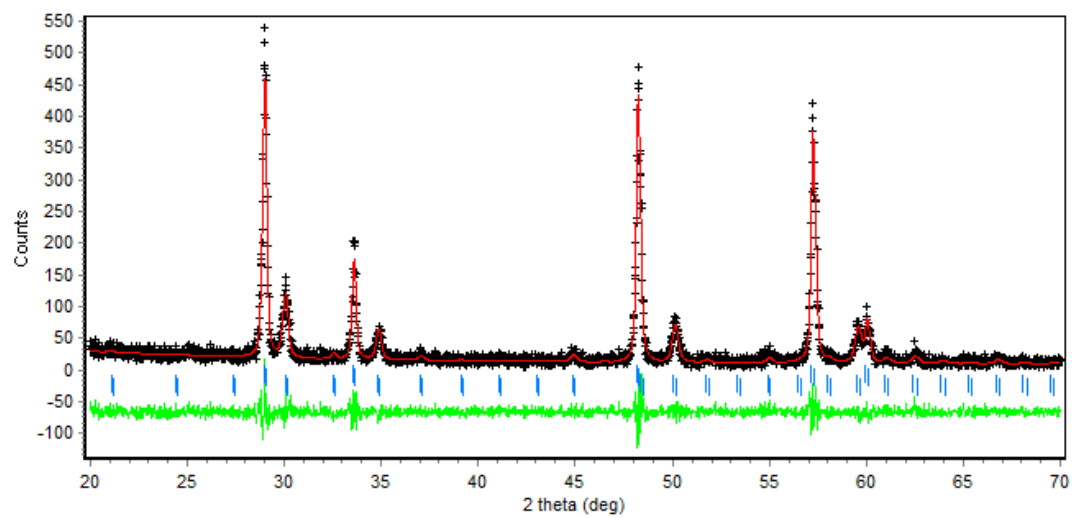
#### Serbuk awal $CeO_2$



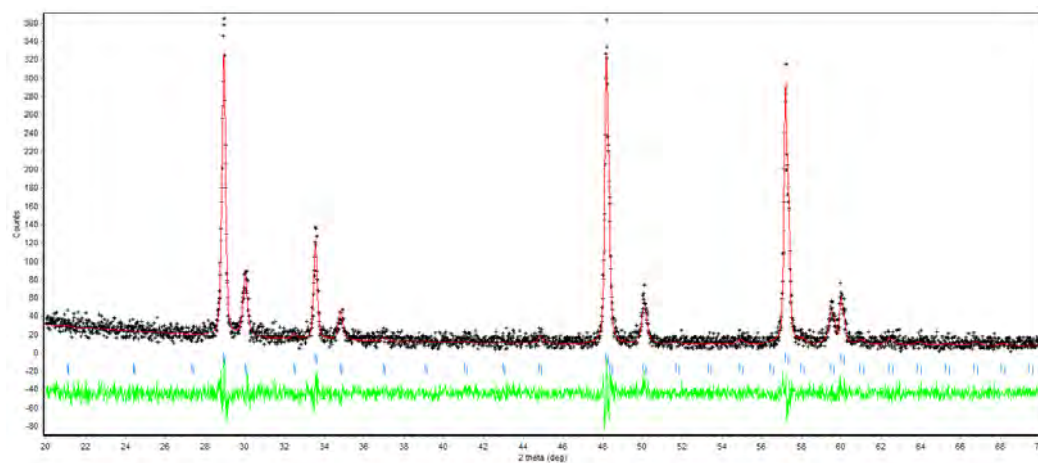
#### Serbuk awal $Yb_2O_3$



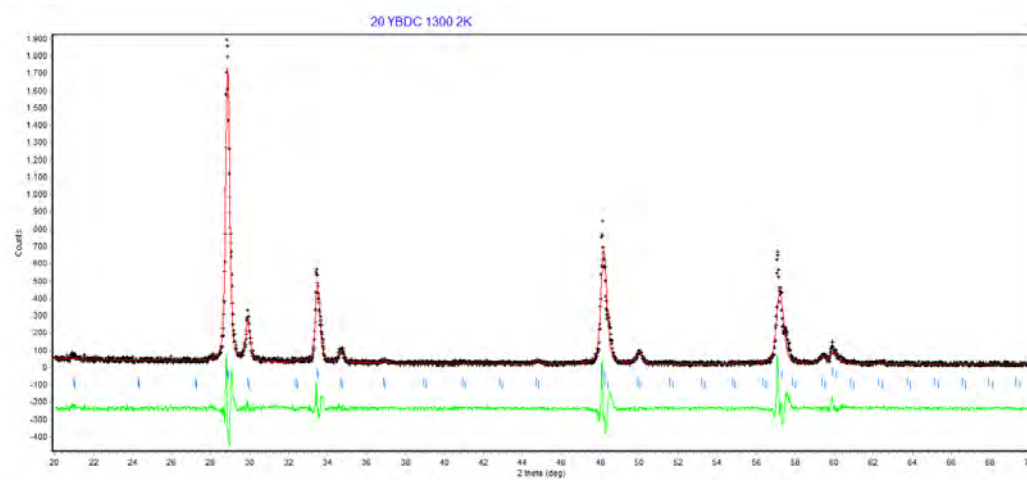
### S-1100



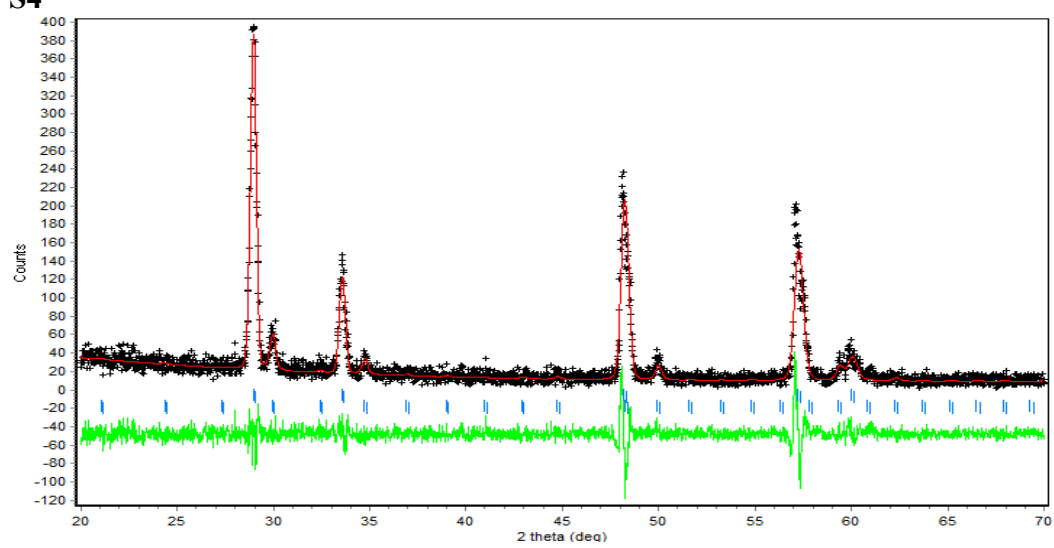
### S-1200



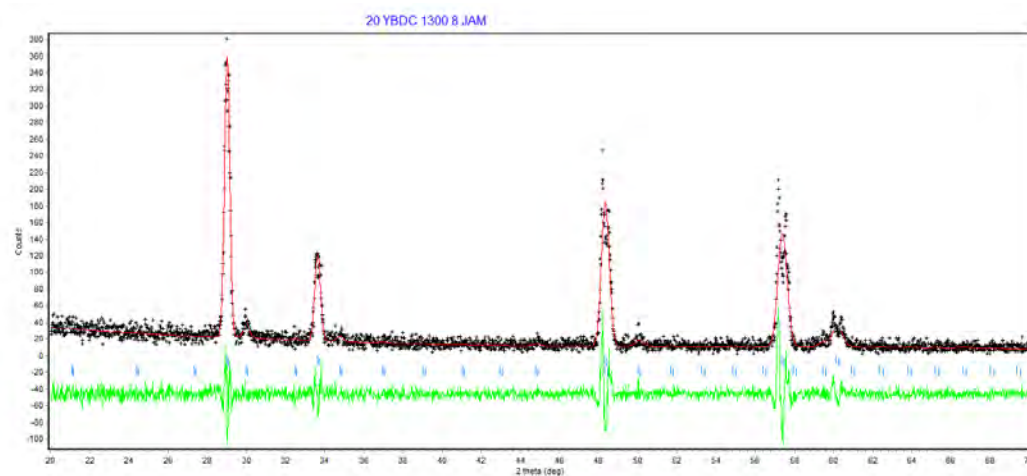
S-1300/S2



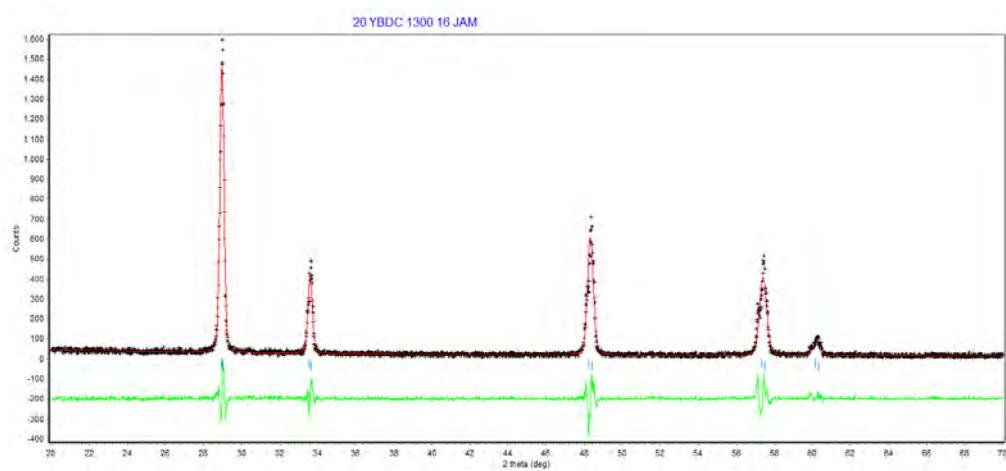
S4



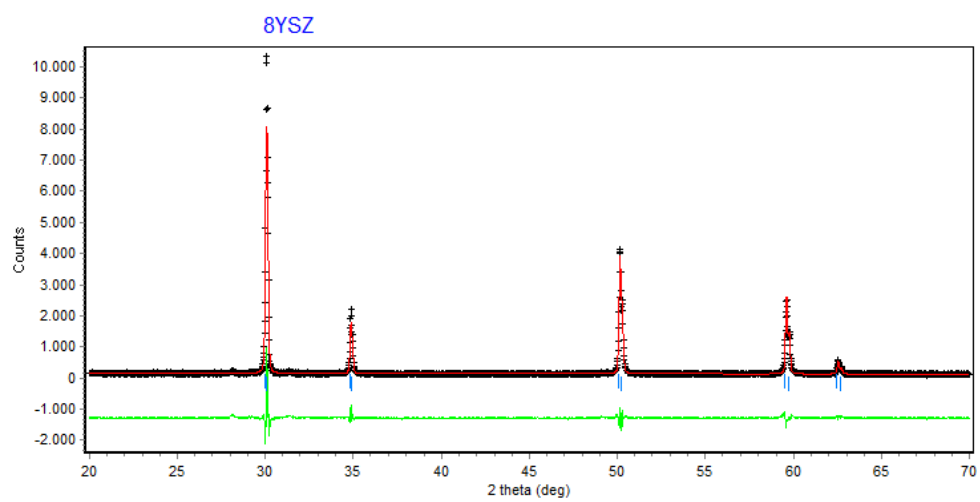
S8



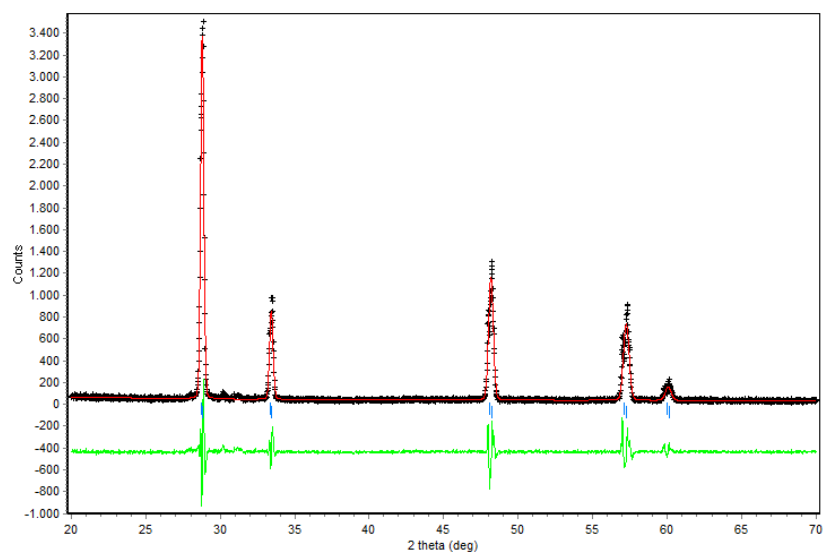
S16



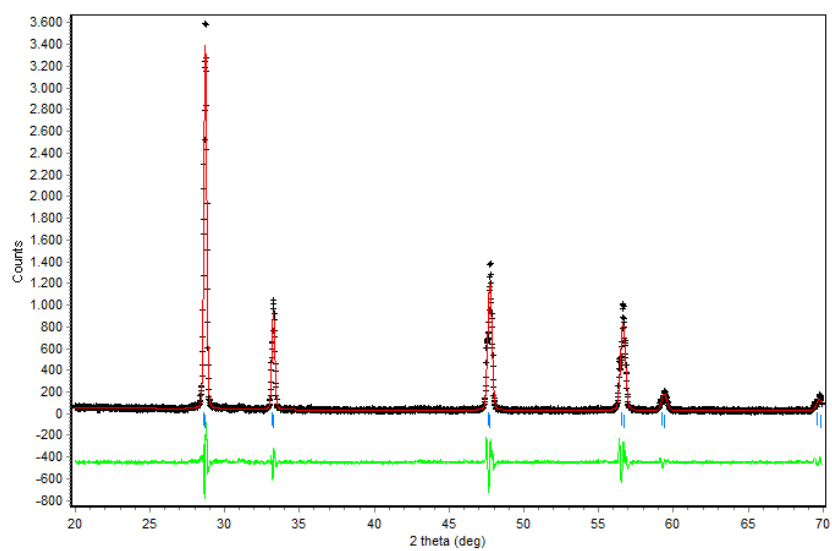
PELET 8YSZ



## Pelet TP



## Pelet P



## Pelet P+B

### Perhitungan untuk serbuk P+B

Hukum Bragg dengan persamaan sebagai berikut:

$$d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$
$$\sin^2 \theta = \frac{\lambda^2}{4a^2} (h^2 + k^2 + l^2)$$

Contoh perhitungan:

$$2\theta = 28,44 \quad \theta = 14,22 \quad \lambda = 1,540598 \text{ \AA} \quad h=1 \quad k=1 \quad l=1$$

$$\sin^2(14,22) = \frac{(1,540598 \text{ \AA})^2}{4a^2} (1^2 + 1^2 + 1^2)$$

$$0,06034184 = \frac{2,37344}{4a^2} (3)$$

$$a = 5,43138601 \text{ \AA}$$

**Tabel C.4** Nilai parameter kisi untuk fasa CeO<sub>2</sub> pada berbagai nilai  $\theta$

No	Indeks miller			$\theta$	a (Å)
	h	k	l		
1	1	1	1	14,22	5,4314
2	2	0	0	16,49	5,4291
3	2	2	0	23,69	5,4236
4	3	1	1	28,12	5,4213
5	2	2	2	29,49	5,4214
Rata-rata a (Å)					5,4254

**Tabel C.5** Nilai parameter kisi untuk fasa Yb<sub>x</sub>Ce<sub>1-x</sub>O<sub>2-x/2</sub> pada berbagai nilai  $\theta$

No	Indeks miller			$\theta$	a (Å)
	h	k	l		
1	1	1	1	14,30	5,4034
2	2	0	0	16,58	5,4004
3	2	2	0	23,83	5,3925
4	3	1	1	28,29	5,3906
5	2	2	2	29,60	5,4030
Rata-rata a (Å)					5,3980

**Tabel C.6** Nilai parameter kisi untuk fasa  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  pada berbagai nilai  $\theta$

No	Indeks miller			$\theta$	a (Å)
	h	k	l		
1	2	2	2	14,46	10,6862
2	4	0	0	17,76	10,1012
3	4	4	0	24,11	10,6672
4	6	2	2	28,57	10,6826
Rata-rata a (Å)					10,5343



**LAMPIRAN D**  
***CODING DARI SOFTWARE MATLAB***

```
>> data=xlsread('a.xlsx')
>> kol1=data(:,1)
>> kol2=data(:,2)
>> [xfit,yfit,Rfit] = circfit(kol1,kol2)
>> figure
plot(kol1,kol2,'b.')
axis equal
[xfit,yfit,Rfit] = circfit(kol1,kol2);
figure
plot(kol1,kol2,'b.')
hold on
rectangle('position',[xfit-Rfit,yfit-
Rfit,Rfit*2,Rfit*2],...
    'curvature',[1,1],'linestyle','-
    ','edgecolor','r');
title(sprintf('Best fit: R = %0.1f; Ctr =
(%0.1f,%0.1f)',...
    Rfit,xfit,yfit));
plot(xfit,yfit,'g.')
xlim([xfit-Rfit-2,xfit+Rfit+2])
ylim([yfit-Rfit-2,yfit+Rfit+2])
axis equal
```

```

%try_circ_fit
%
% IB
%
% revival of a 13 years old code

% Create data for a circle + noise

th = linspace(0,2*pi,20)';
R=1.1111111;
sigma = R/10;
x = R*cos(th)+randn(size(th))*sigma;
y = R*sin(th)+randn(size(th))*sigma;

plot(x,y,'o'), title(' measured points')
pause(1)

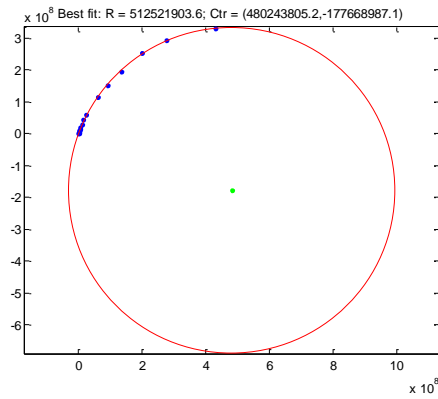
% reconstruct circle from data
[xc,yc,Re,a] = circfit(x,y);
xe = Re*cos(th)+xc; ye = Re*sin(th)+yc;

plot(x,y,'o',[xe;xe(1)],[ye;ye(1)],'-
.',R*cos(th),R*sin(th)),
title(' measured fitted and true circles')
legend('measured','fitted','true')
text(xc-R*0.9,yc,sprintf('center (%g , %g );
R=%g',xc,yc,Re))
xlabel x, ylabel y
axis equal

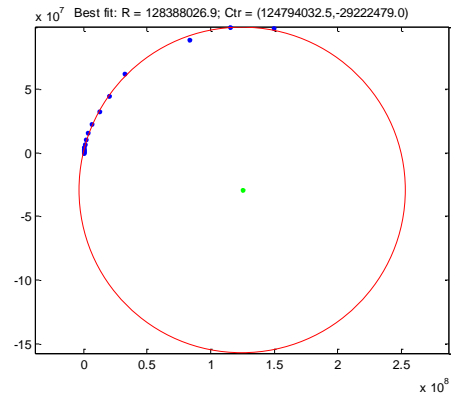
```

## DATA NILAI RADIUS

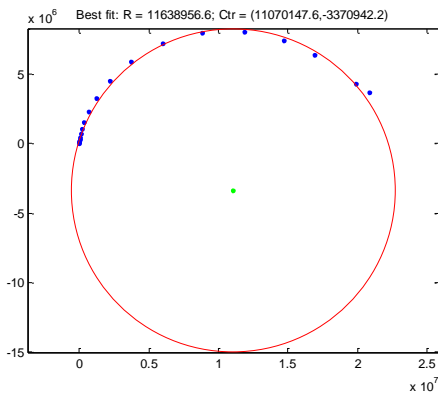
### 8YSZ



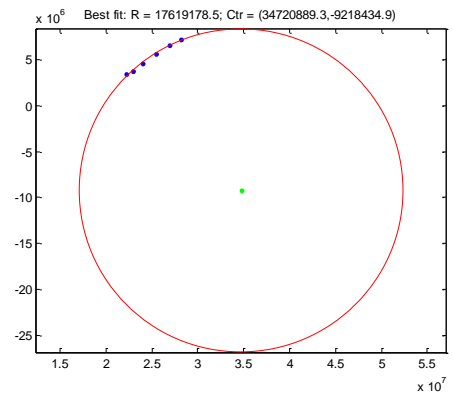
Gambar 107. T=100



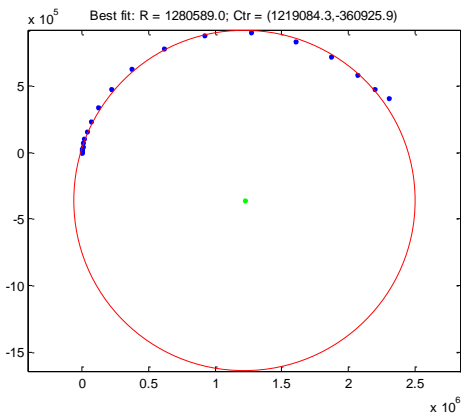
Gambar 108. T=150



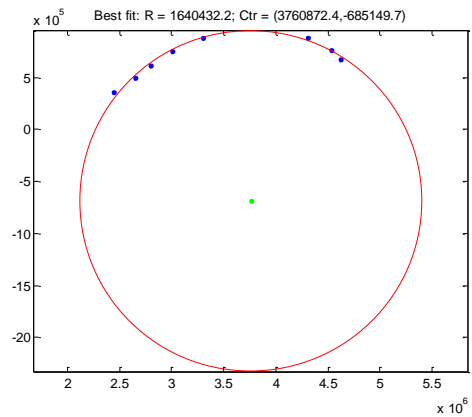
Gambar 109. T= 200 Butir



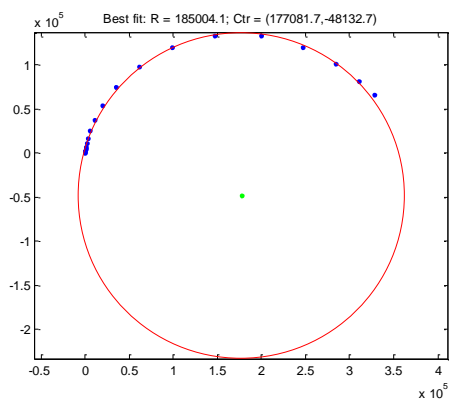
Gambar 110. T= 200 Batas butir



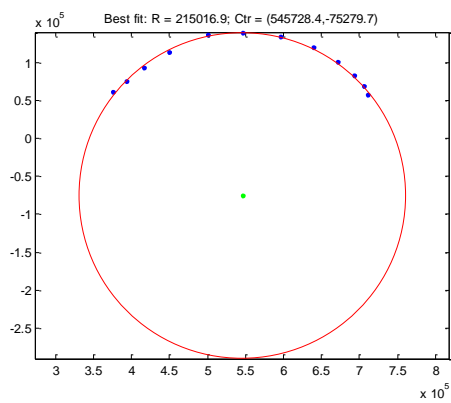
Gambar 111. T = 250 Butir



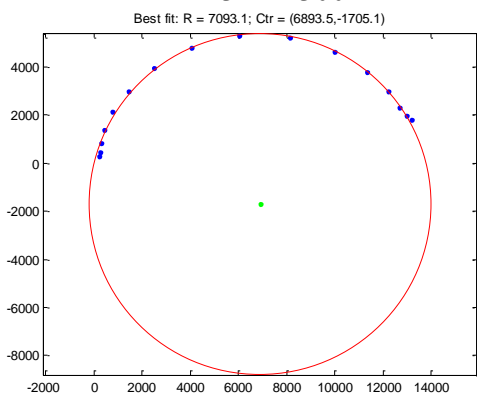
Gambar 112. T= 250 Batas Butir



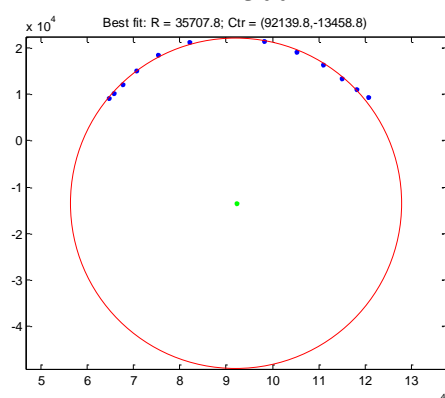
Gambar 113.  $T = 300$  Butir



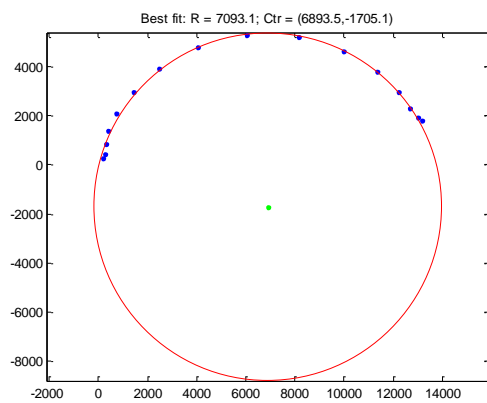
Gambar 114.  $T = 300$  Batas Butir



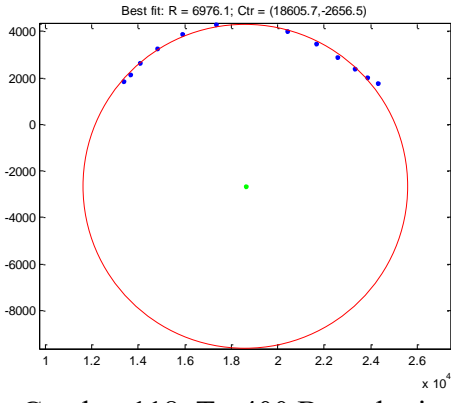
Gambar 115.  $T = 350$  Butir



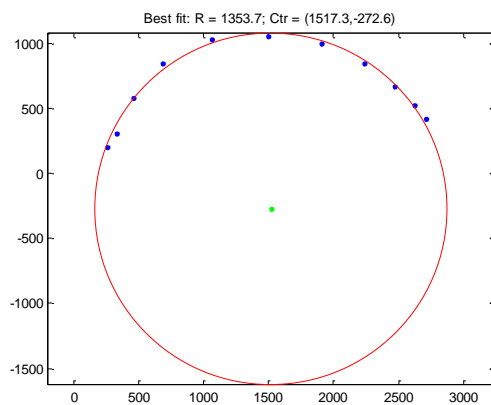
Gambar 116.  $T = 350$  Batas butir



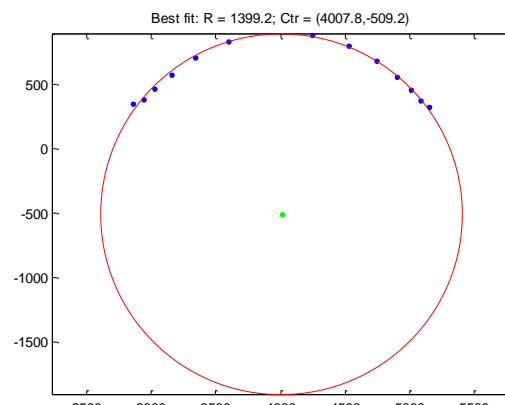
Gambar 117.  $T = 400$  Butir



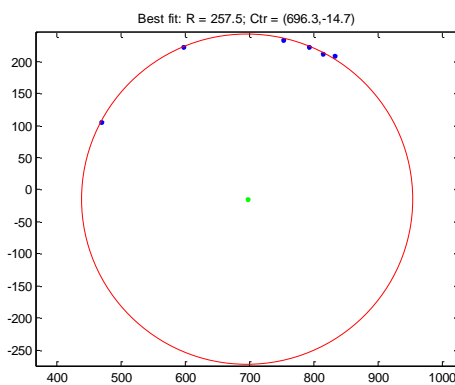
Gambar 118.  $T = 400$  Batas butir



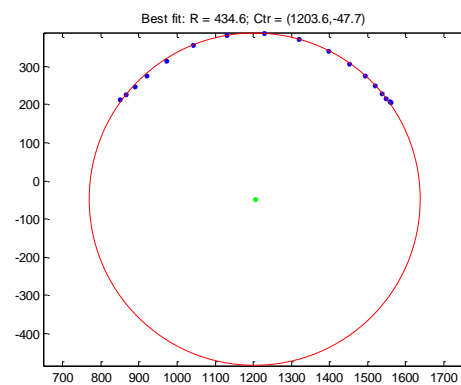
Gambar 118. T = 450 Butir



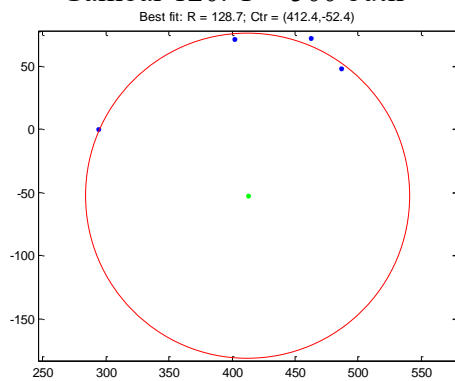
Gambar 119. T = 450 Batas butir



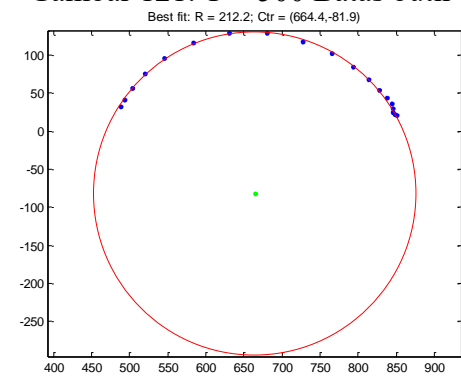
Gambar 120. T = 500 butir



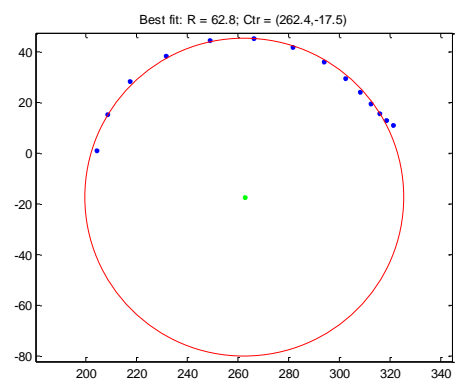
Gambar 121. T = 500 Batas butir



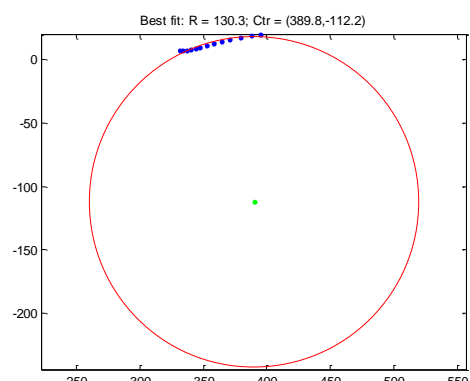
Gambar 122. T = 550 Butir



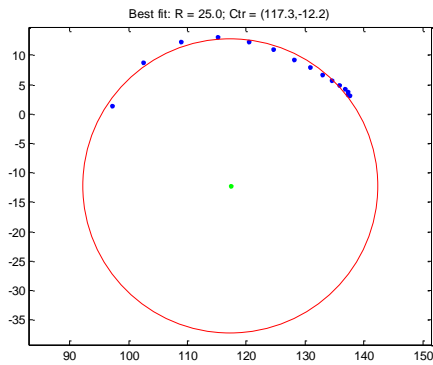
Gambar 123. T = 550 Batas butir



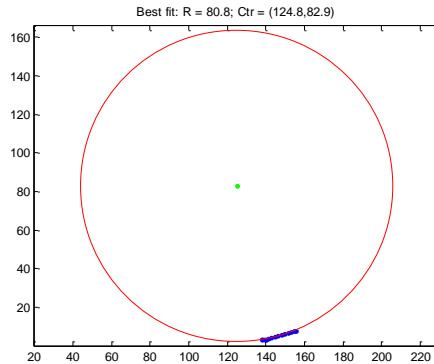
Gambar 124. T = 600 Butir



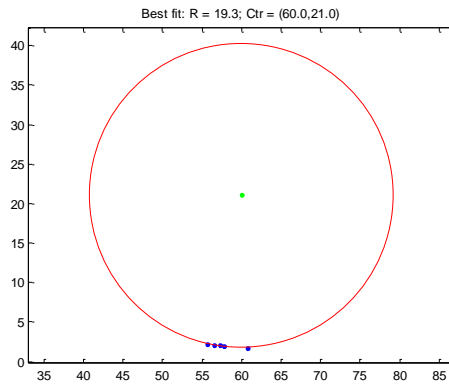
Gambar 125. T = 600 Batas Butir



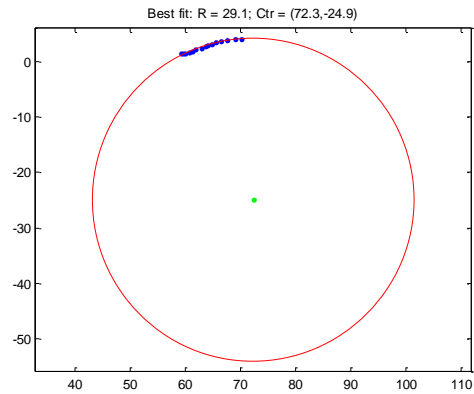
Gambar 126. T = 650 Butir



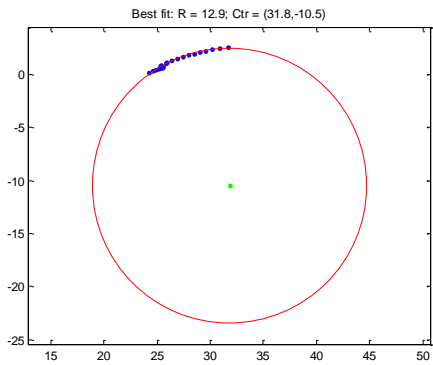
Gambar 127. T = 650 Batas Butir



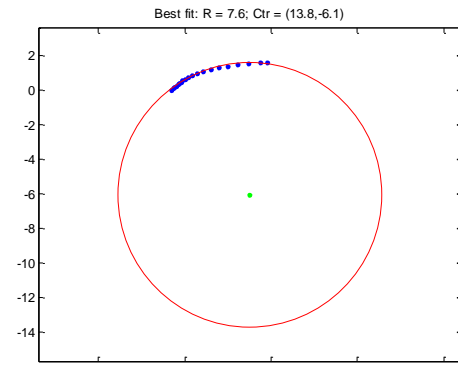
Gambar 128. T = 700 Butir



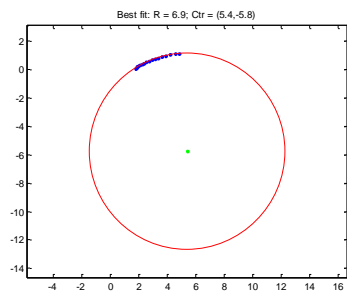
Gambar 129. T = 700 Batas Butir



Gambar 130. T = 750 butir

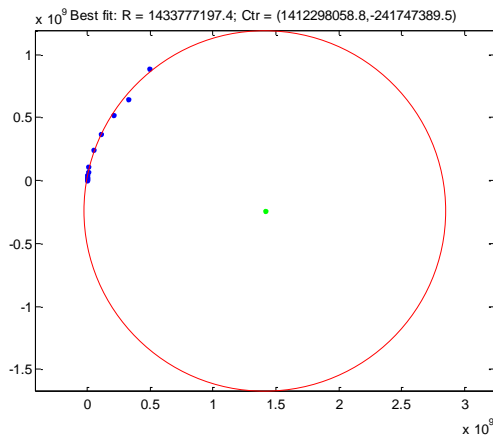


Gambar 131. T = 800 butir

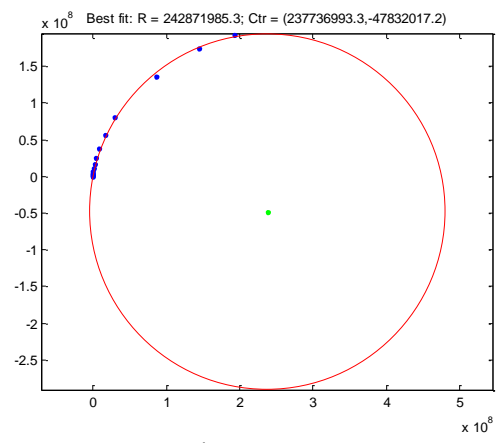


Gambar 132. T = 850 butir

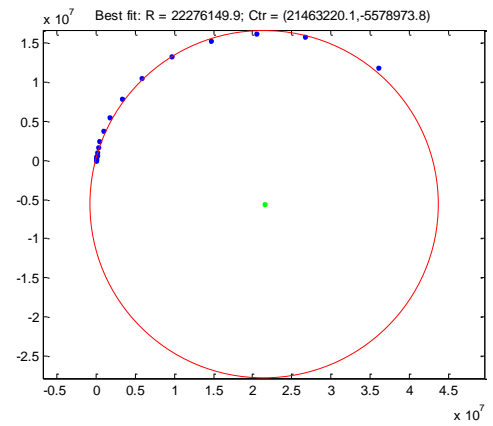
TP



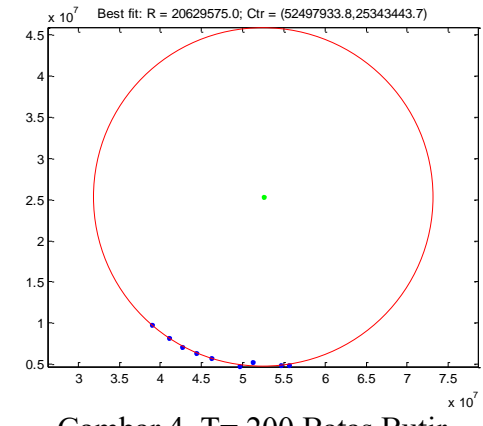
Gambar 1. T=100



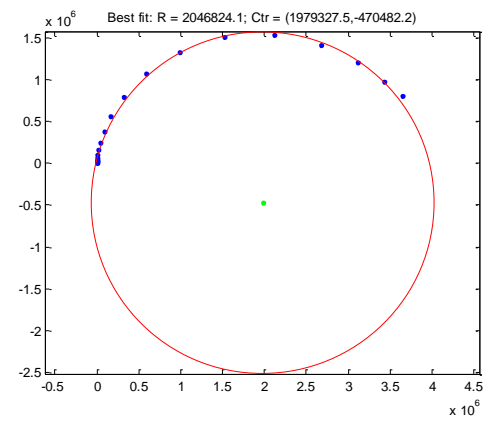
Gambar 2. T=150



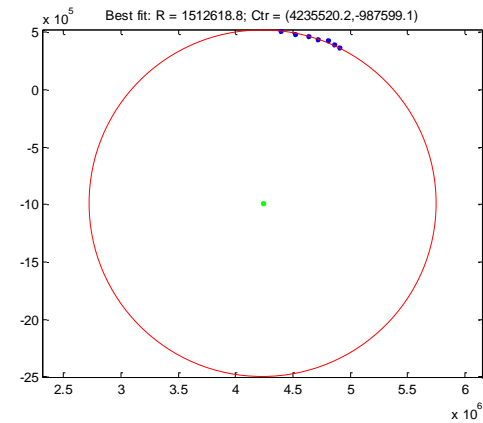
Gambar 3. T= 200 Butir



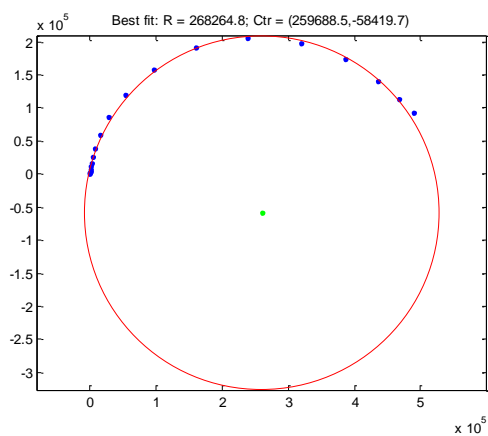
Gambar 4. T= 200 Batas Butir



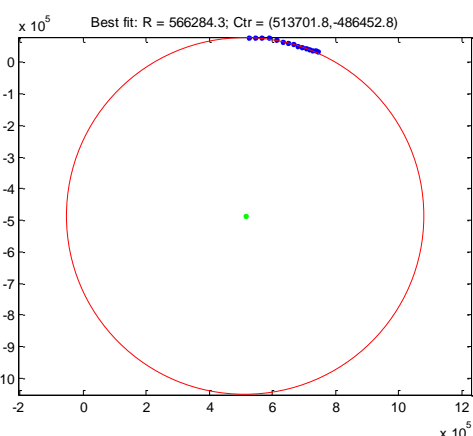
Gambar 5. T = 250 Butir



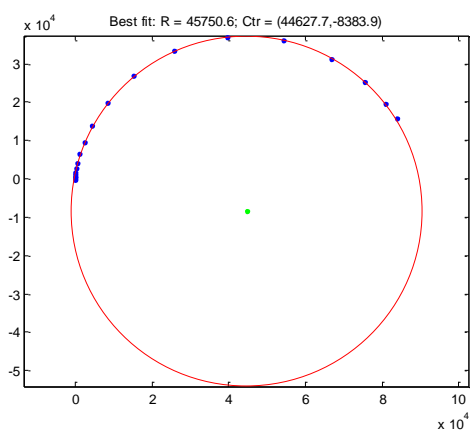
Gambar 6. T= 250 Batas Butir



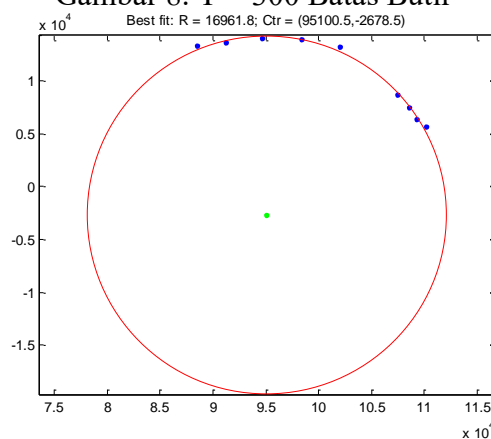
Gambar 7.  $T = 300$  Butir



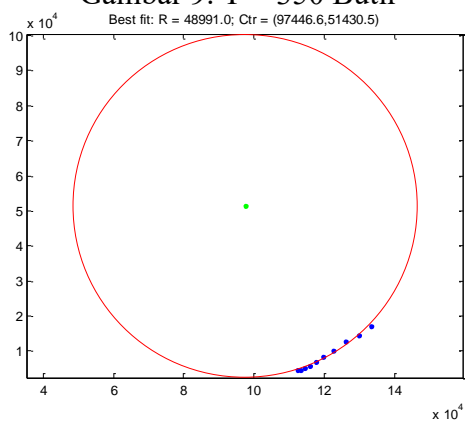
Gambar 8.  $T = 300$  Batas Butir



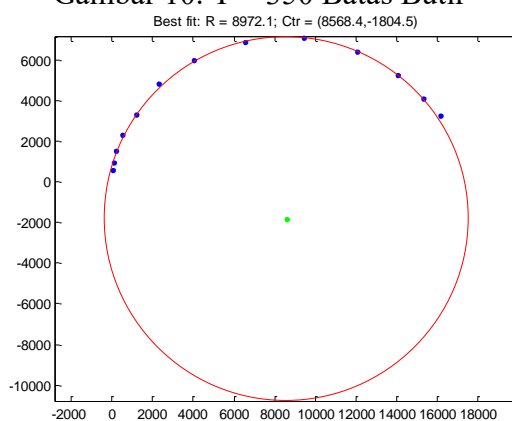
Gambar 9.  $T = 350$  Butir



Gambar 10.  $T = 350$  Batas Butir

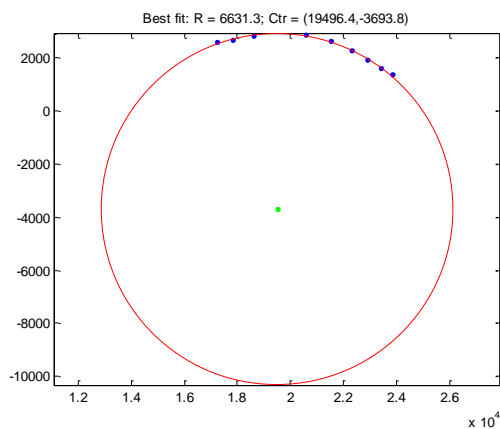


Gambar 11.  $T = 350$  Elektroda

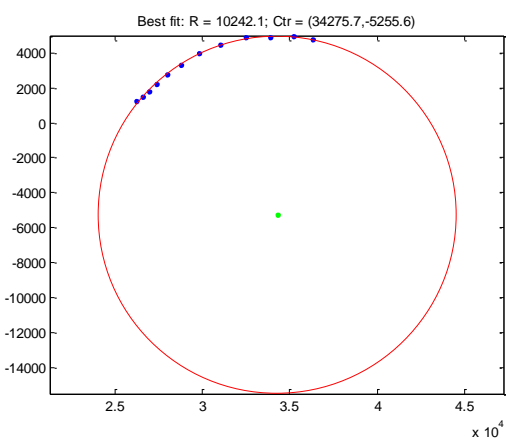


Gambar 12.  $T = 400$  Butir

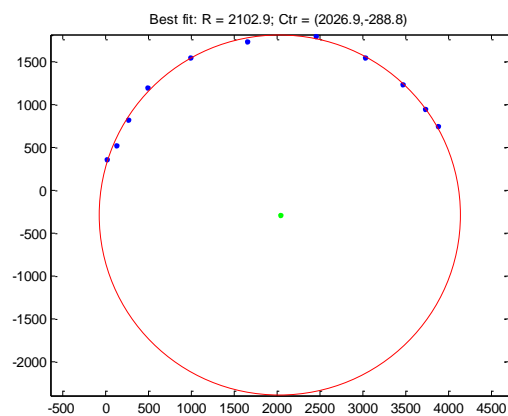




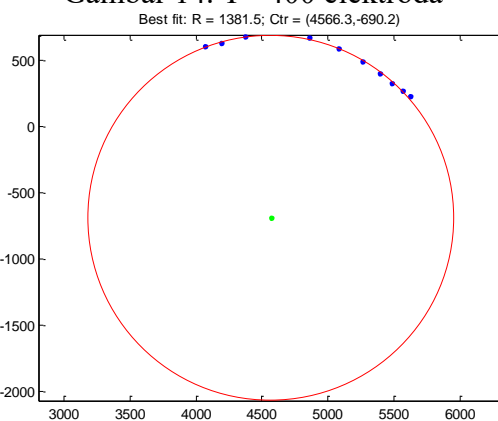
Gambar 13. T= 400 Batas Butir



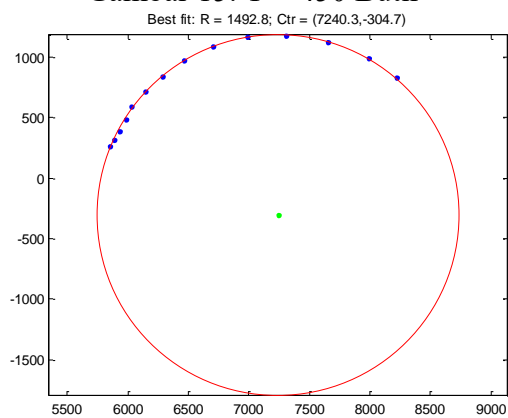
Gambar 14. T= 400 elektroda



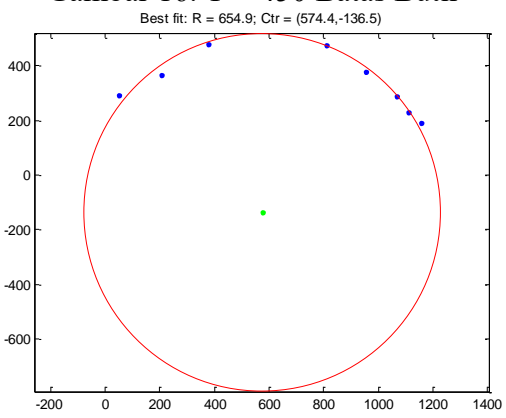
Gambar 15. T = 450 Butir



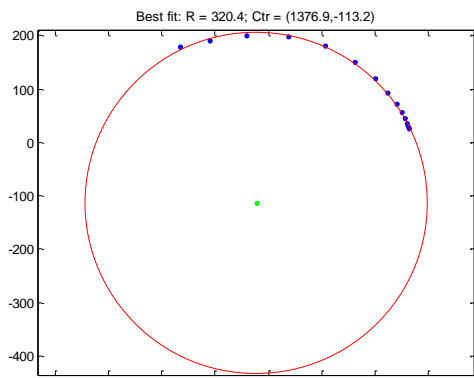
Gambar 16. T = 450 Batas Butir



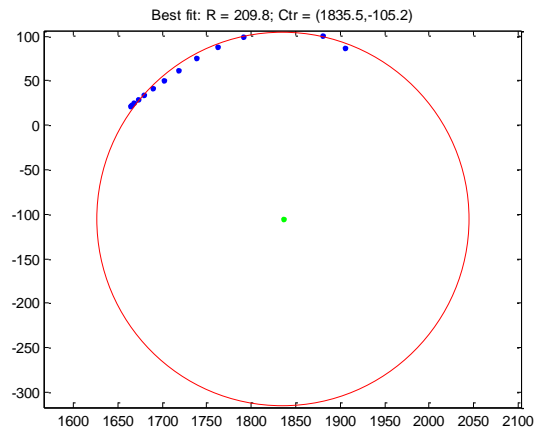
Gambar 17. T = 450 elektroda



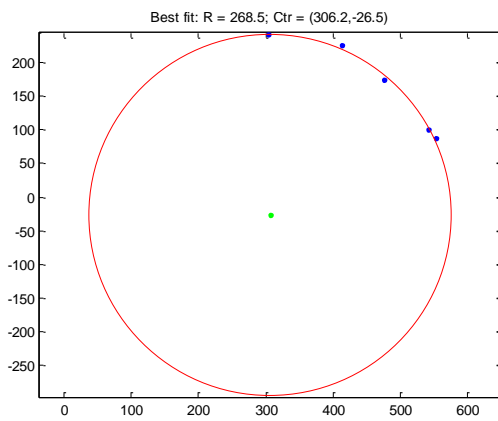
Gambar 18. T = 500 Butir



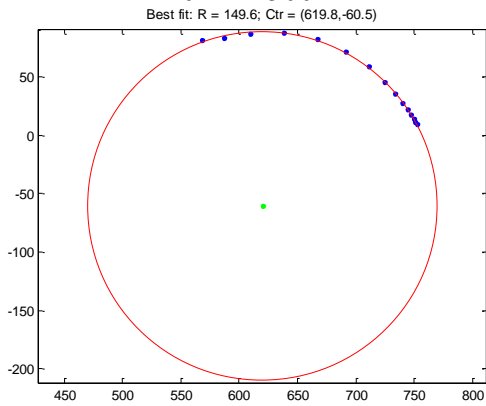
Gambar 19. T = 500 Batas Butir



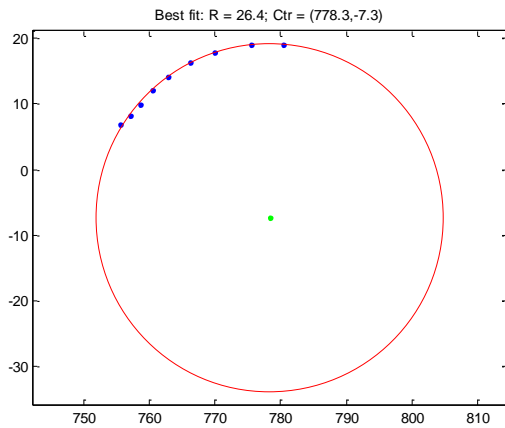
Gambar 20. T = 500 elektroda



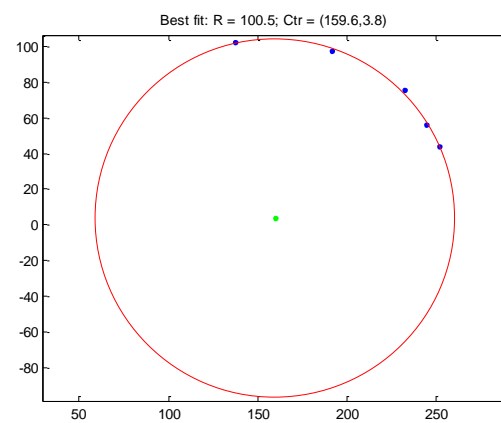
Gambar 21. T = 550 Butir



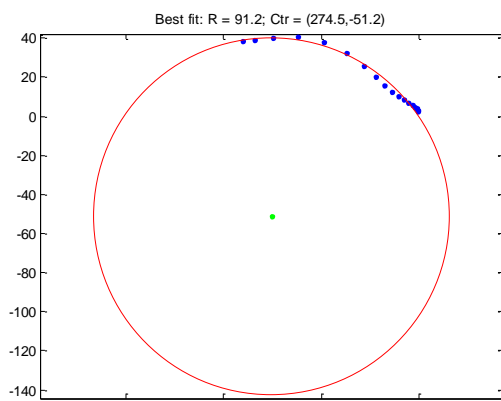
Gambar 22. T = 550 Batas Butir



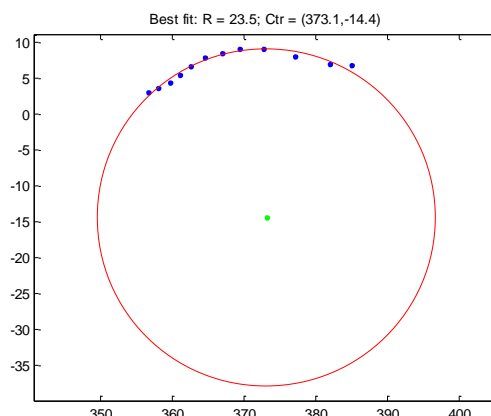
Gambar 23. T = 550 elektroda



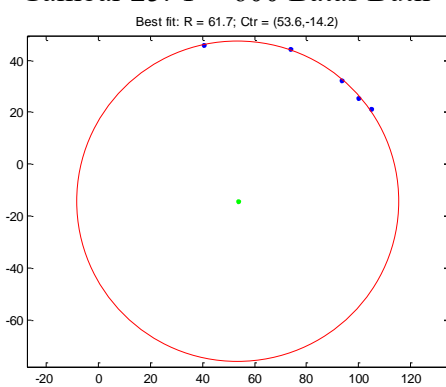
Gambar 24. T = 600 Butir



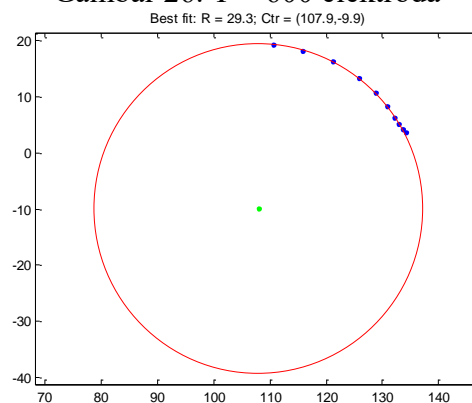
Gambar 25. T = 600 Batas Butir



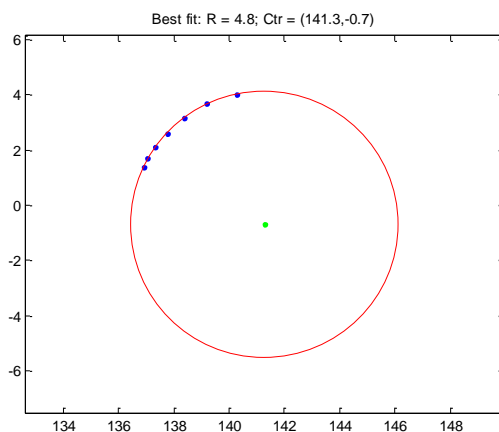
Gambar 26. T = 600 elektroda



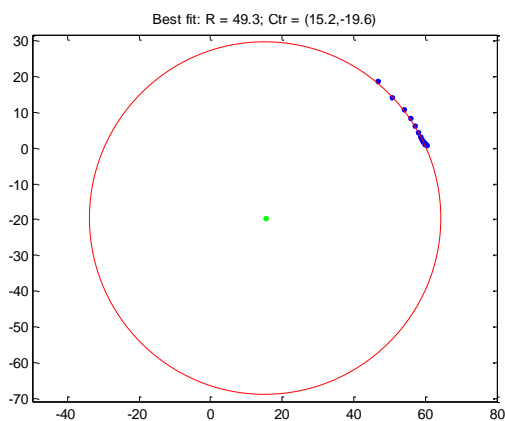
Gambar 27. T = 650 Butir



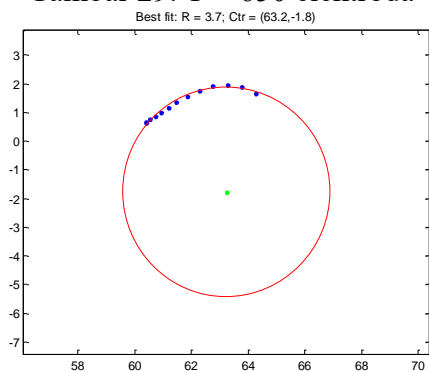
Gambar 28. T = 650 Batas Butir



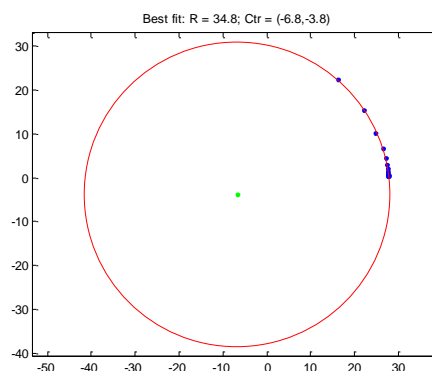
Gambar 29. T = 650 elektroda



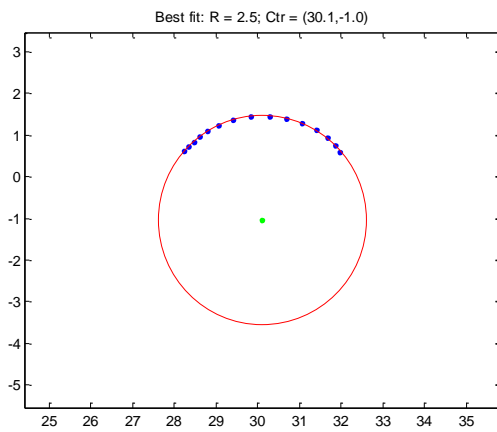
Gambar 30. T = 700 Butir



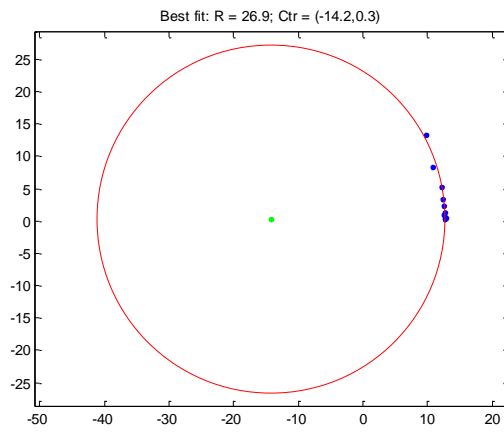
Gambar 31. T = 700 Batas Butir



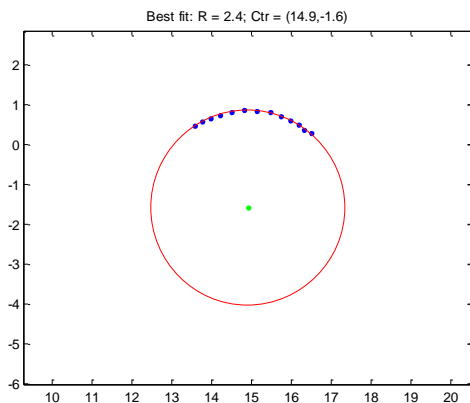
Gambar 32. T = 750 Butir



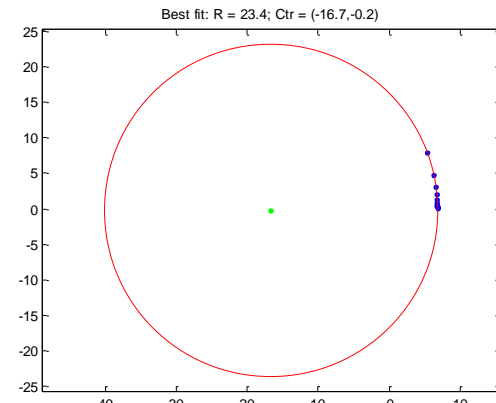
Gambar 33.  $T = 750$  Batas Butir



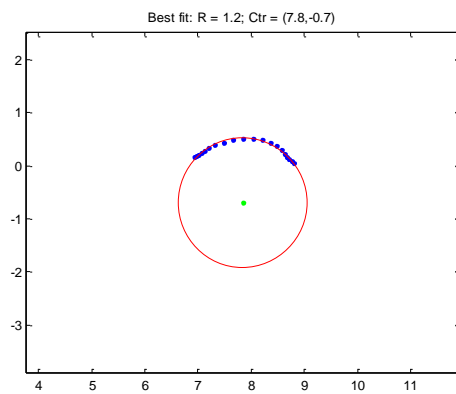
Gambar 34.  $T = 800$  Butir



Gambar 35.  $T = 800$  Batas Butir

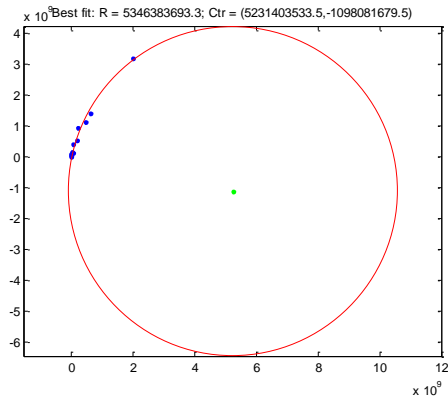


Gambar 36.  $T = 850$  Butir

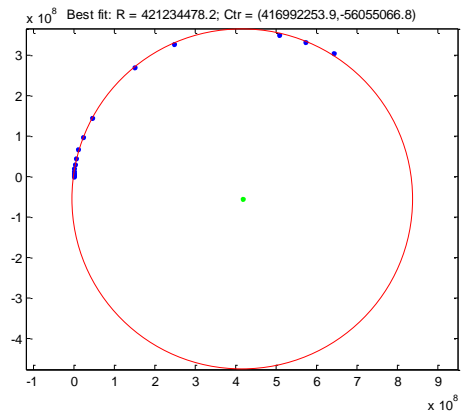


Gambar 37.  $T = 850$  Batas Butir

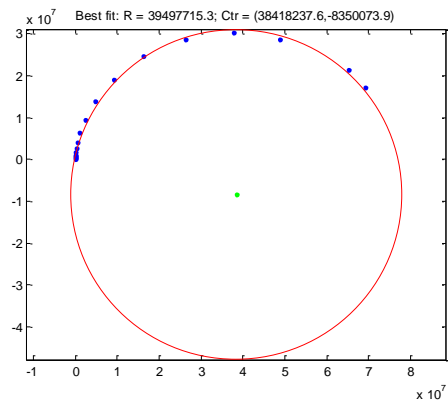
## PEMANASAN (P)



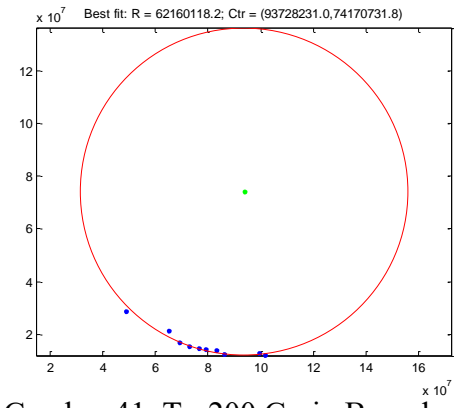
Gambar 38. T=100



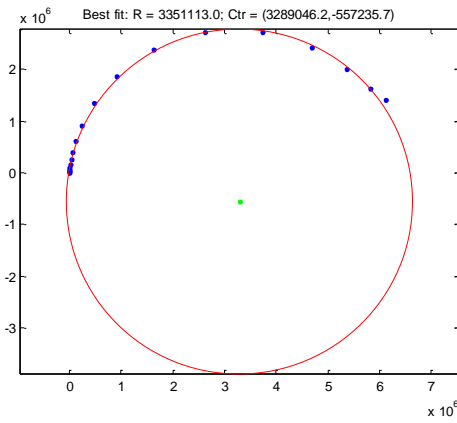
Gambar 39. T=150



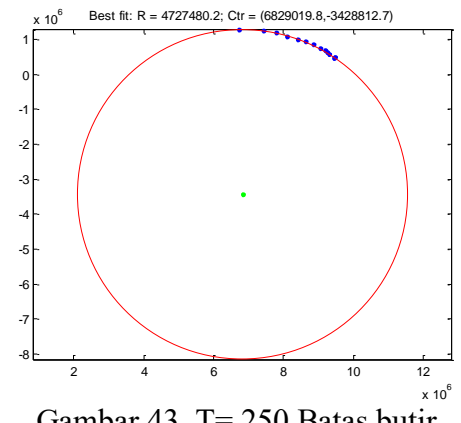
Gambar 40. T= 200 Grain



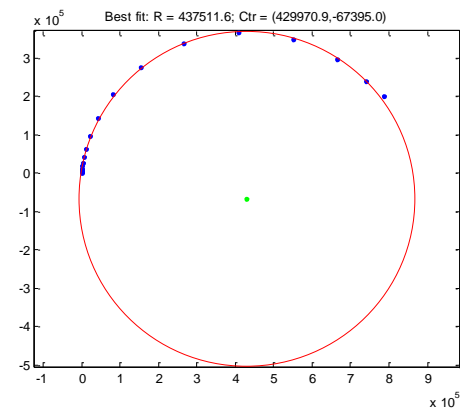
Gambar 41. T= 200 Grain Boundary



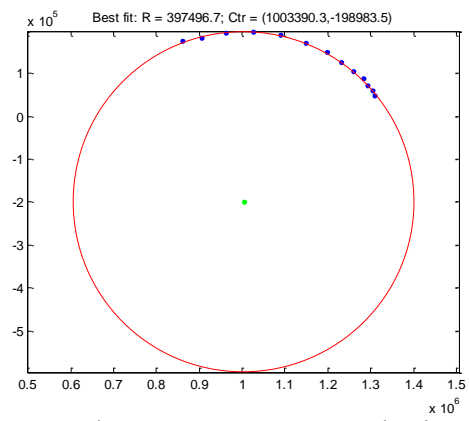
Gambar 42. T = 250 Butir



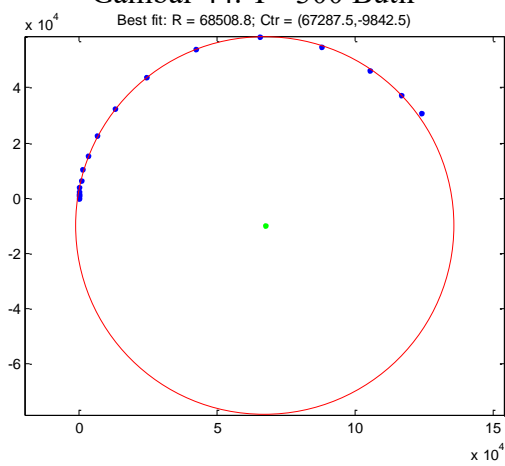
Gambar 43. T= 250 Batas butir



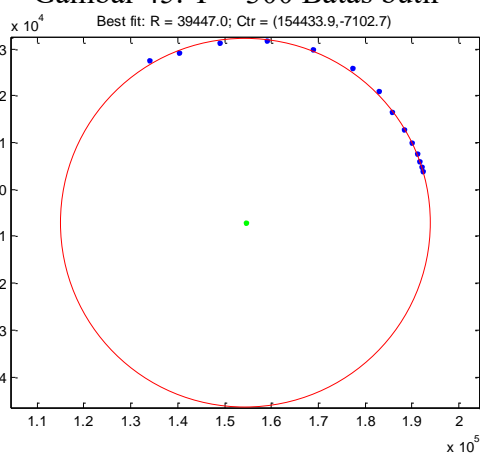
Gambar 44.  $T = 300$  Butir



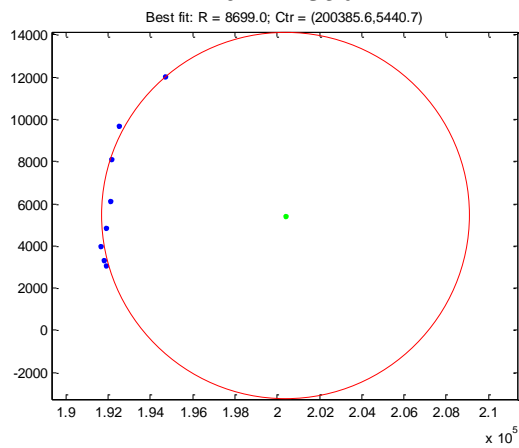
Gambar 45.  $T = 300$  Batas butir



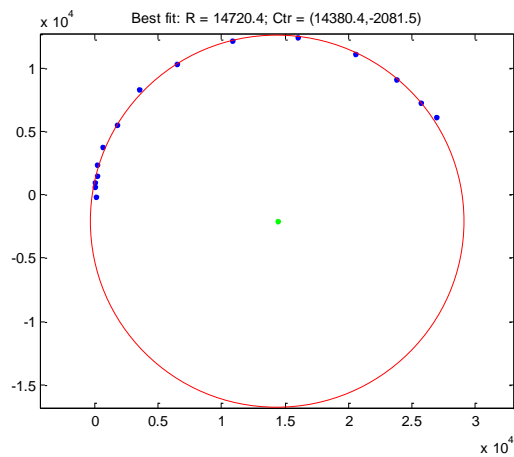
Gambar 46.  $T = 350$  Butir



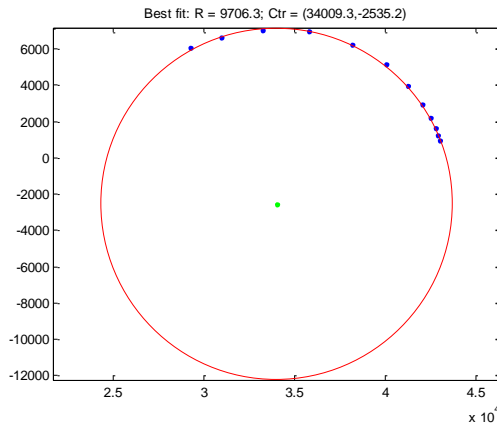
Gambar 47.  $T = 350$  Batas butir



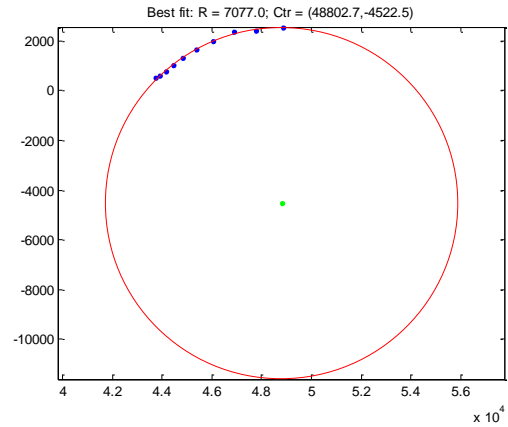
Gambar 48.  $T = 350$  Elektroda



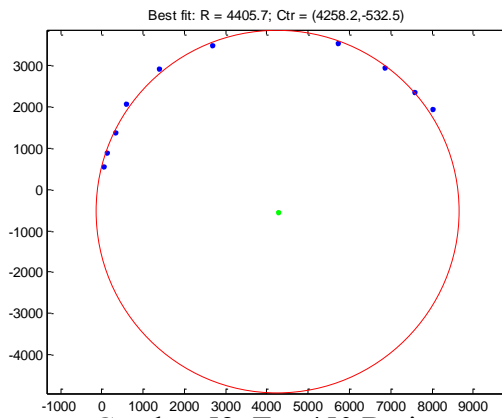
Gambar 49.  $T = 400$  Butir



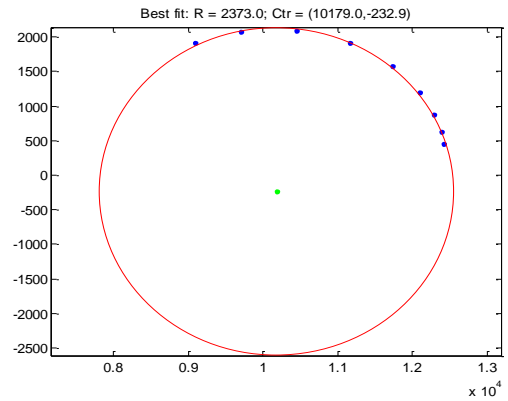
Gambar 50. T= 400 Batas butir



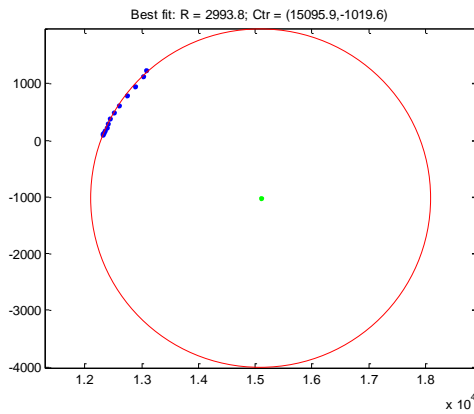
Gambar 51. T= 400 elektroda



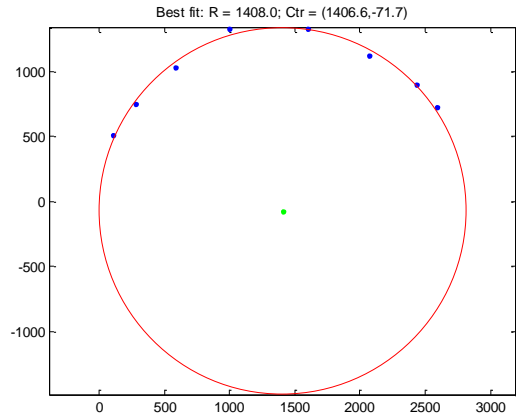
Gambar 52. T = 450 Butir



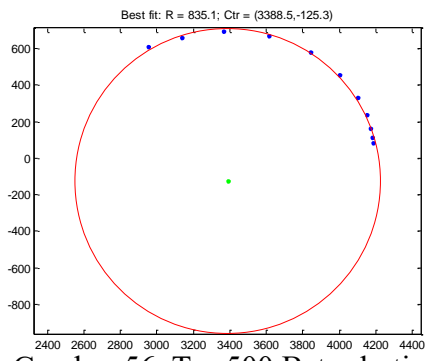
Gambar 53. T = 450 Batas butir



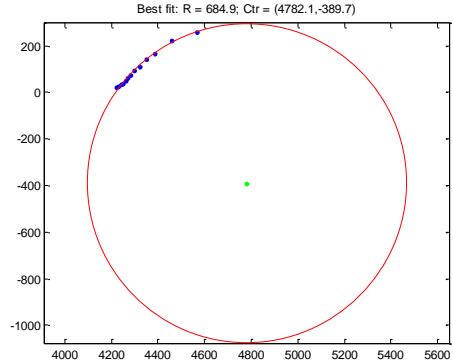
Gambar 54. T = 450 elektroda



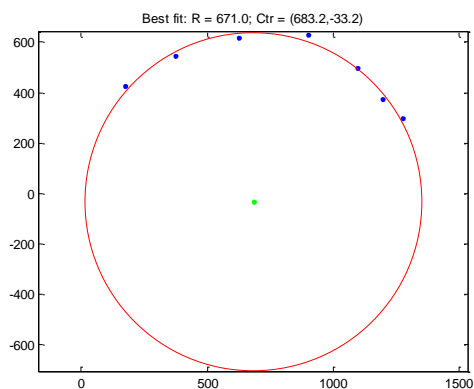
Gambar 55. T = 500 Butir



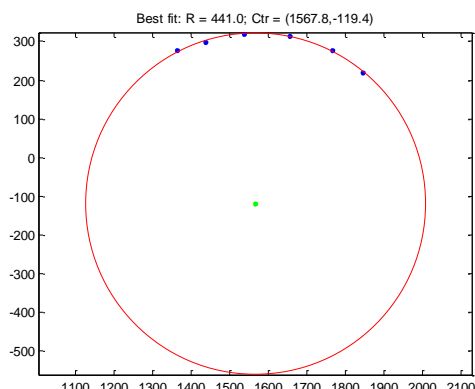
Gambar 56. T = 500 Batas butir



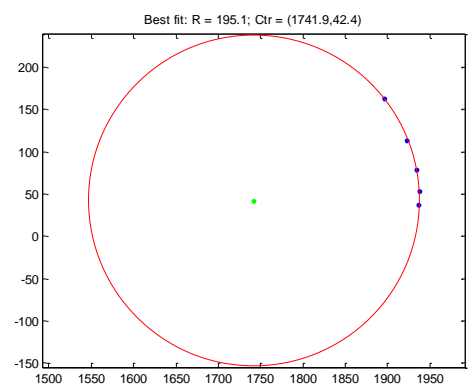
Gambar 57. T = 500 elektroda



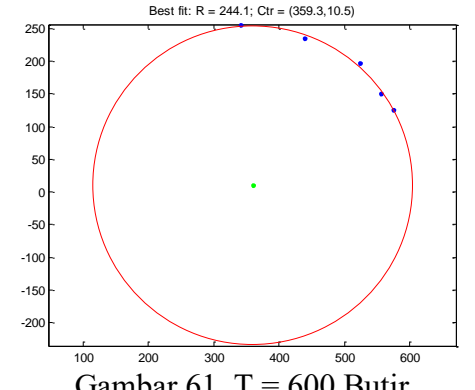
Gambar 58. T = 550 Butir



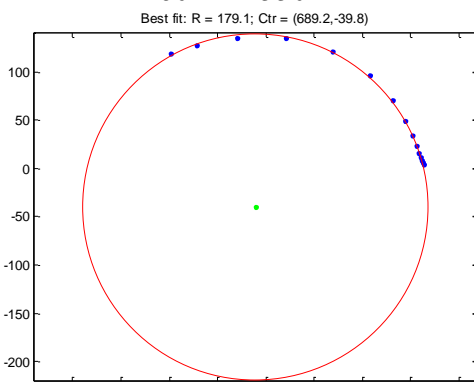
Gambar 59. T = 550 Batas butir



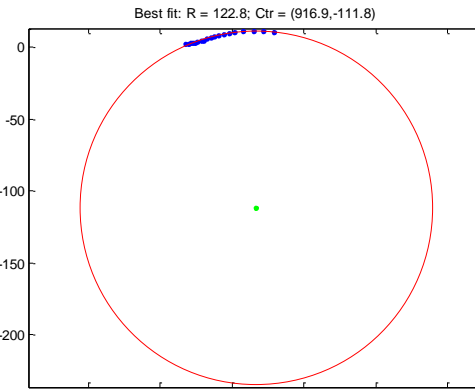
Gambar 60. T = 550 elektroda



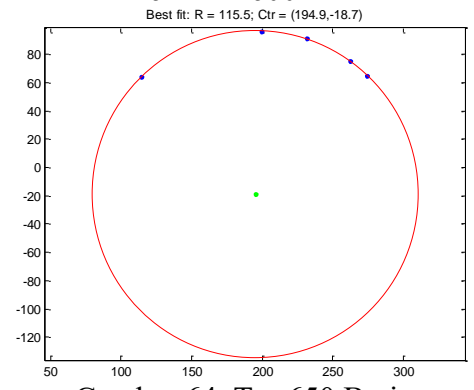
Gambar 61. T = 600 Butir



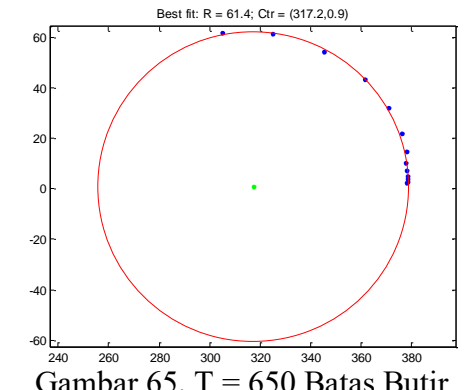
Gambar 62. T = 600 Batas butir



Gambar 63. T = 600 elektroda

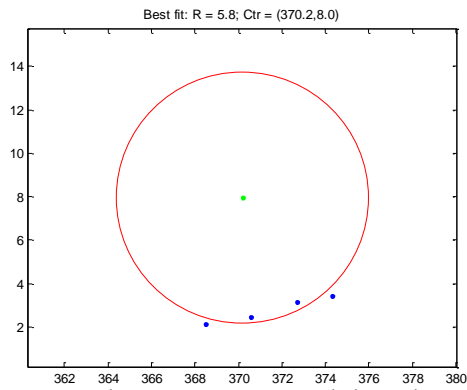


Gambar 64. T = 650 Butir

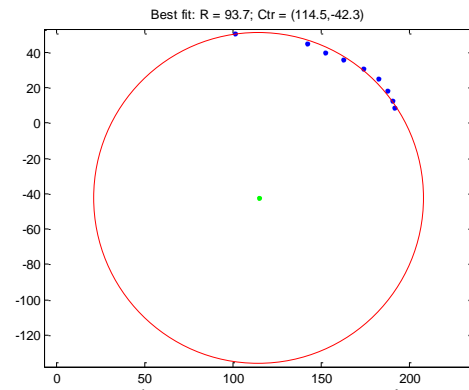


Gambar 65. T = 650 Batas Butir

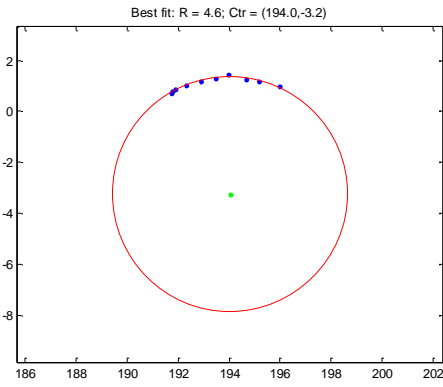




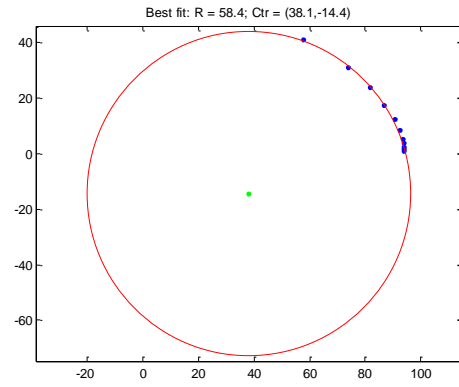
Gambar 66.  $T = 650$  elektroda



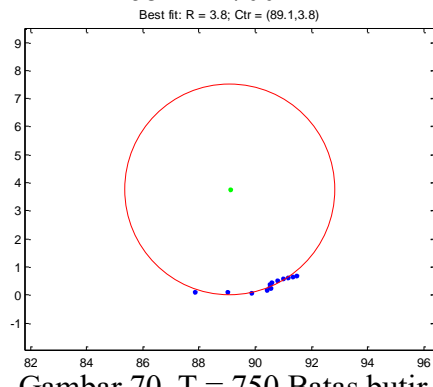
Gambar 67.  $T = 700$  Butir



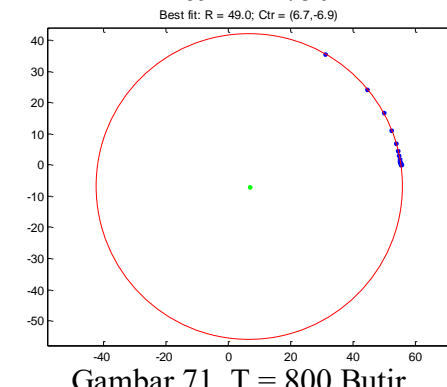
Gambar 68.  $T = 700$  Batas Butir



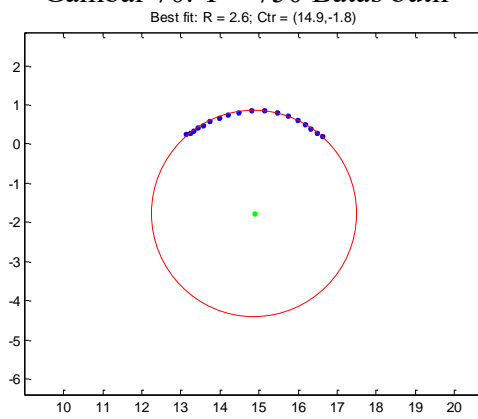
Gambar 69.  $T = 750$  Butir



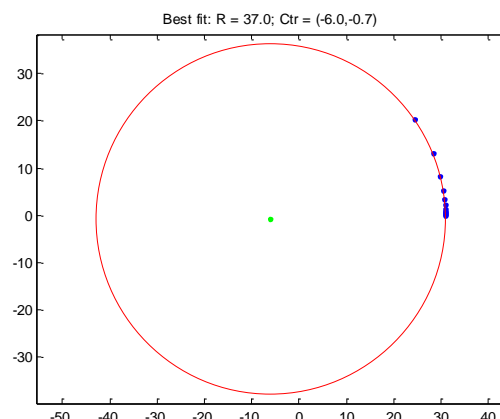
Gambar 70.  $T = 750$  Batas butir



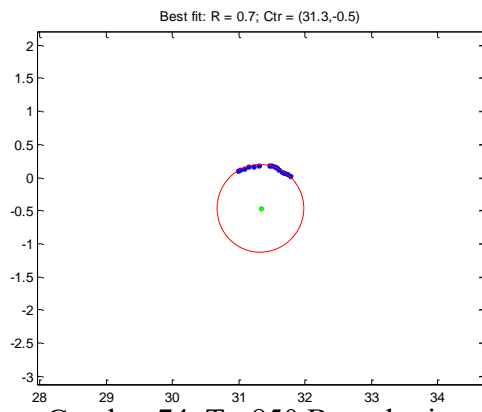
Gambar 71.  $T = 800$  Butir



Gambar 72.  $T = 800$  Batas butir

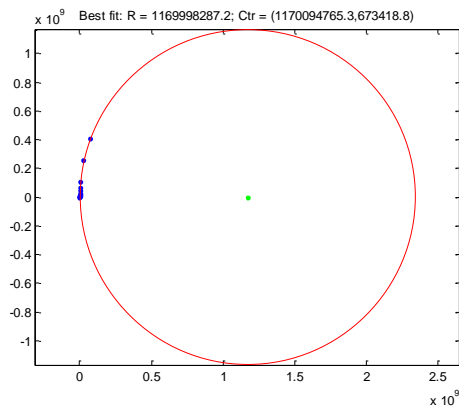


Gambar 73.  $T = 850$  Butir

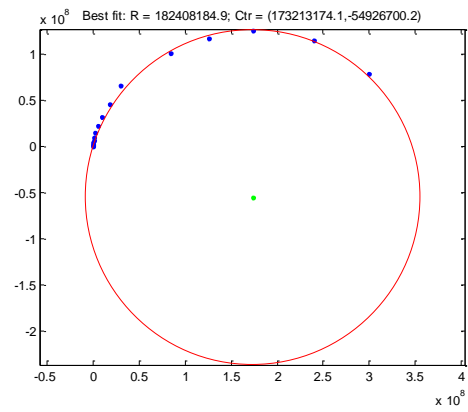


Gambar 74. T= 850 Batas butir

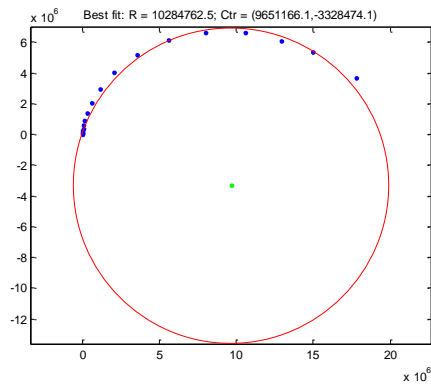
**P+B**



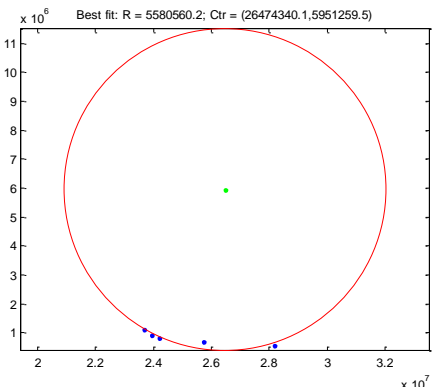
**Gambar 75. T=100**



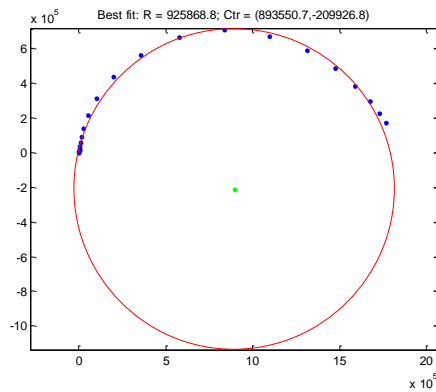
**Gambar 76. T=150**



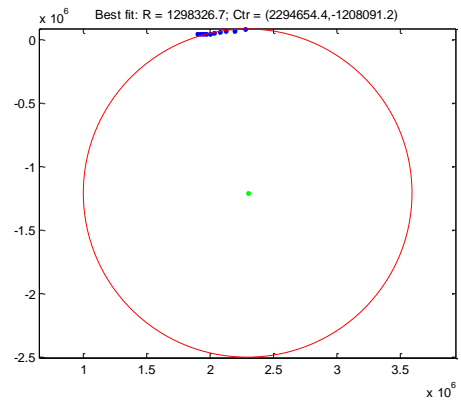
**Gambar 77. T= 200 Butir**



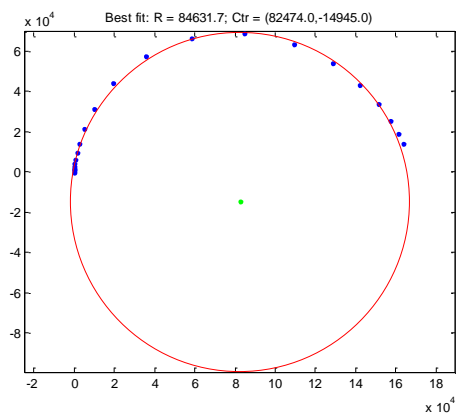
**Gambar 78. T= 200 Batas butir**



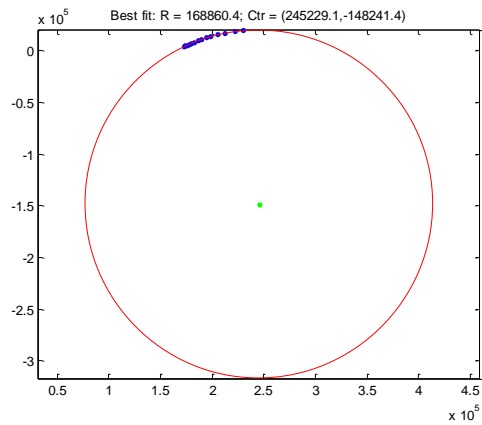
**Gambar 79. T = 250 Butir**



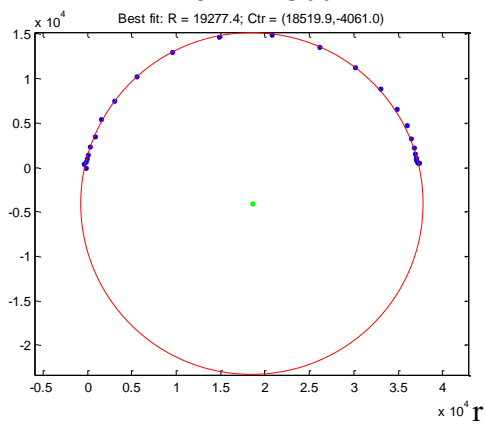
**Gambar 80. T= 250 Batas Butir**



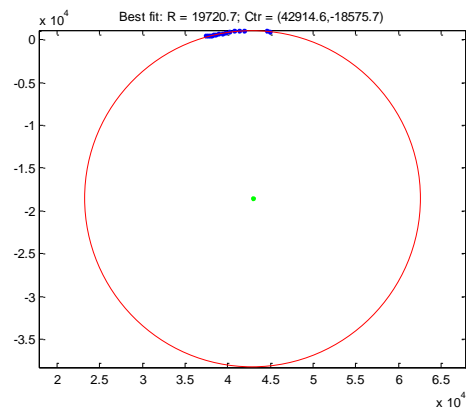
Gambar 81.  $T = 300$  Butir



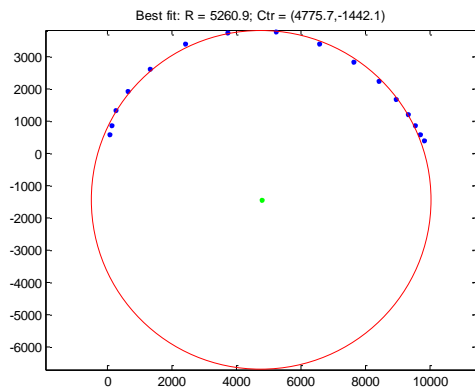
Gambar 82.  $T = 300$  Batas Butir



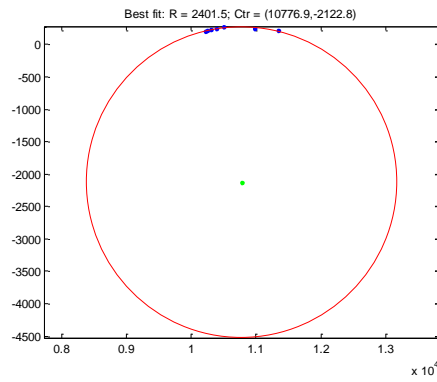
Gambar 83.  $T = 350$  Butir



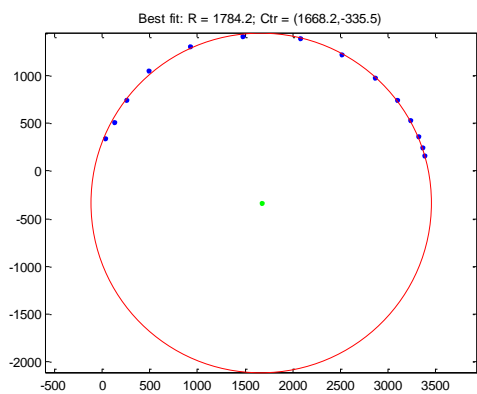
Gambar 84.  $T = 350$  Batas butir



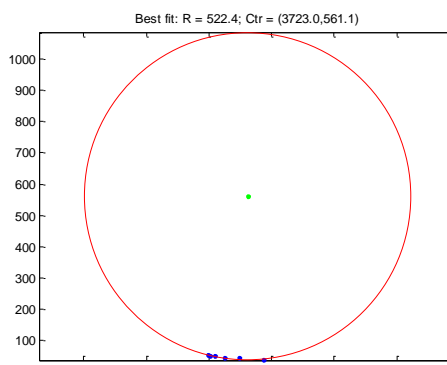
Gambar 85.  $T = 400$  Butir



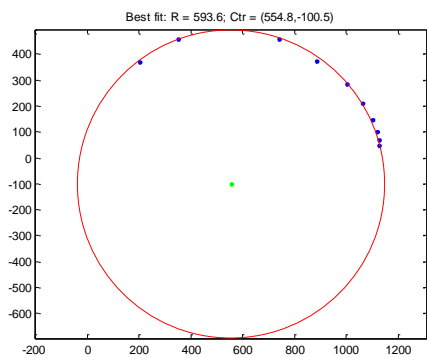
Gambar 86.  $T = 400$  Batas butir



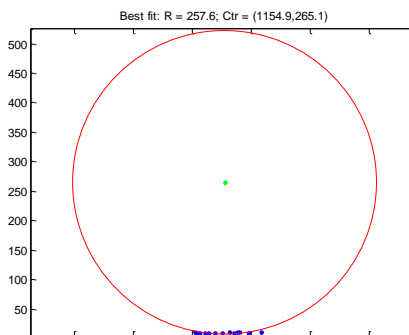
Gambar 87. T = 450 Butir



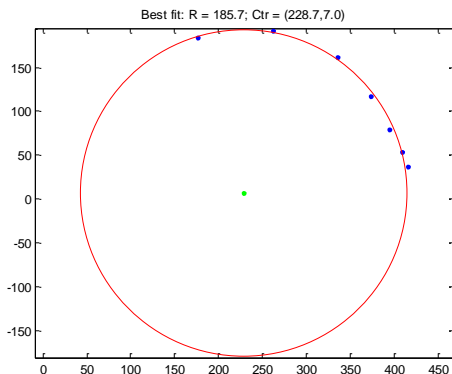
Gambar 88. T = 450 Batas butir



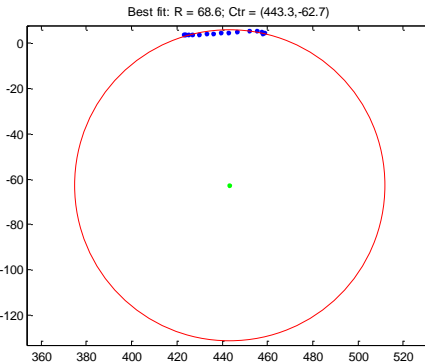
Gambar 89. T = 500 butir



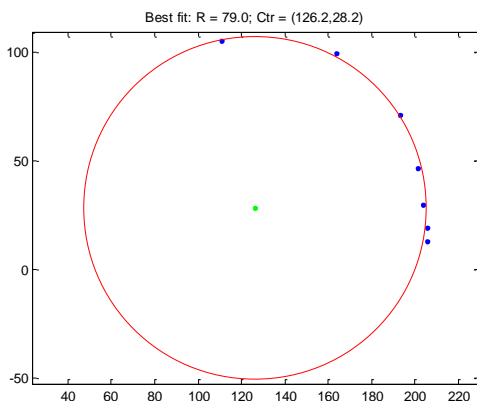
Gambar 90. T = 500 Batas butir



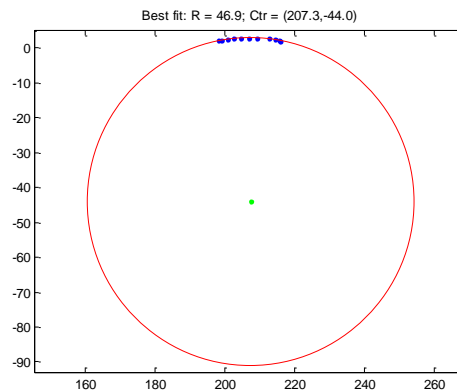
Gambar 90. T = 550 Butir



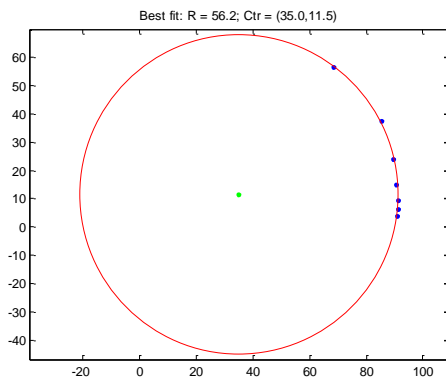
Gambar 91. T = 550 Batas butir



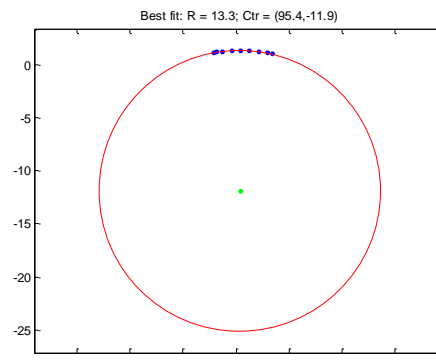
Gambar 92. T = 600 Butir



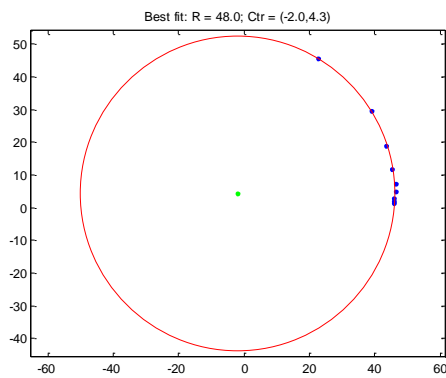
Gambar 93. T = 600 Batas Butir



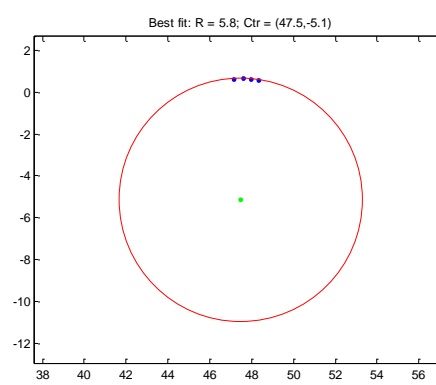
Gambar 94. T = 650 Butir



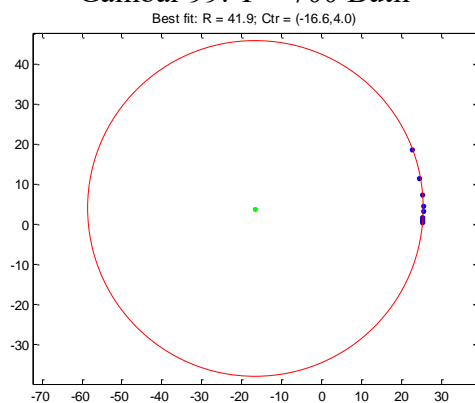
Gambar 95. T = 650 Batas Butir



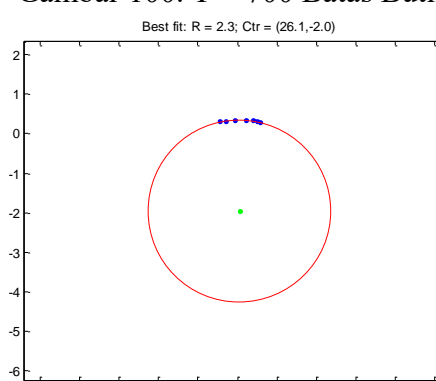
Gambar 99. T = 700 Butir



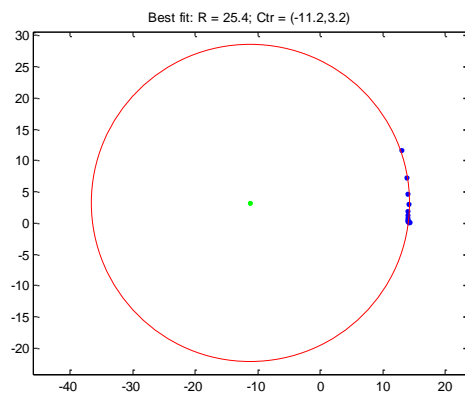
Gambar 100. T = 700 Batas Butir



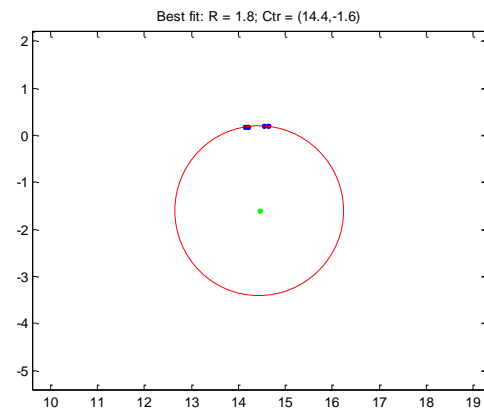
Gambar 101. T = 750 butir



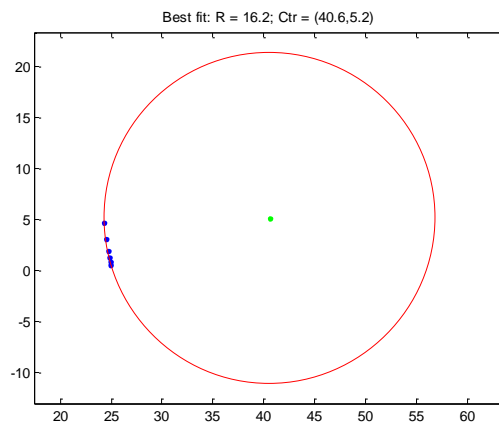
Gambar 102. T = 750 Batas Butir



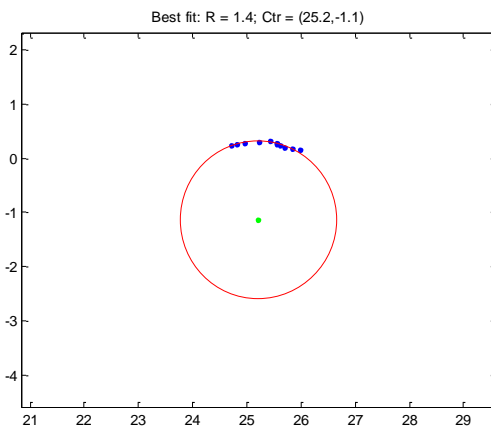
Gambar 103. T = 800 butir



Gambar 104. T = 800 Batas Butir



Gambar 105. T= 850 butir



Gambar 106. T= 850 Batas butir

D.1 Nilai resistansi  $R_{\text{grain}}$  dan  $R_{\text{gb}}$  untuk sampel 8YSZ variasi temperatur

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{grain}}$ (ohm)	$R_{\text{gb}}$ (ohm)
100	$1,02 \times 10^9$	0
150	$2,56 \times 10^8$	0
200	$2,32 \times 10^7$	$3,52 \times 10^7$
250	$2,56 \times 10^6$	$3,28 \times 10^6$
300	$3,70 \times 10^5$	$4,30 \times 10^5$
350	$6,91 \times 10^4$	$7,14 \times 10^4$
400	$1,42 \times 10^4$	$1,39 \times 10^4$
450	$2,71 \times 10^3$	$2,79 \times 10^3$
500	$5,15 \times 10^2$	$8,69 \times 10^2$
550	$2,57 \times 10^2$	$4,24 \times 10^2$
600	$1,25 \times 10^2$	$2,60 \times 10^2$
650	$5,00 \times 10^1$	$1,61 \times 10^2$
700	$1,64 \times 10^1$	$5,82 \times 10^1$
750	$1,40 \times 10^1$	0
800	$1,10 \times 10^1$	0
850	$1,06 \times 10^1$	0

D.2 Nilai resistansi  $R_{\text{grain}}$  dan  $R_{\text{gb}}$  untuk sampel TP pada berbagai temperatur

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{grain}}$ (ohm)	$R_{\text{gb}}$ (ohm)
100	$2,87 \times 10^9$	0
150	$4,86 \times 10^8$	0
200	$4,46 \times 10^7$	$4,13 \times 10^7$
250	$4,09 \times 10^6$	$3,02 \times 10^6$
300	$5,37 \times 10^5$	$1,13 \times 10^6$
350	$9,15 \times 10^4$	$3,39 \times 10^4$
400	$1,79 \times 10^4$	$1,32 \times 10^4$
450	$4,21 \times 10^3$	$2,76 \times 10^3$
500	$1,31 \times 10^3$	$6,41 \times 10^2$
550	$5,37 \times 10^2$	$2,99 \times 10^2$
600	$2,01 \times 10^2$	$1,82 \times 10^2$
650	$1,23 \times 10^2$	$5,86 \times 10^1$
700	$9,86 \times 10^1$	$0,74 \times 10^1$
750	$6,96 \times 10^1$	$0,50 \times 10^1$
800	$5,38 \times 10^1$	$0,48 \times 10^1$
850	$4,68 \times 10^1$	$0,24 \times 10^1$



D.3 Nilai resistansi  $R_{\text{grain}}$  dan  $R_{\text{gb}}$  untuk sampel P variasi temperatur

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{grain}}$ (ohm)	$R_{\text{gb}}$ (ohm)
100	$1,07 \times 10^{10}$	0
150	$8,42 \times 10^8$	0
200	$7,89 \times 10^7$	$1,24 \times 10^8$
250	$6,70 \times 10^6$	$9,45 \times 10^6$
300	$8,75 \times 10^5$	$7,94 \times 10^5$
350	$1,37 \times 10^5$	$7,88 \times 10^4$
400	$2,94 \times 10^4$	$1,94 \times 10^4$
450	$8,81 \times 10^3$	$4,75 \times 10^3$
500	$2,82 \times 10^3$	$1,67 \times 10^3$
550	$1,34 \times 10^3$	$8,82 \times 10^2$
600	$4,88 \times 10^2$	$3,58 \times 10^2$
650	$2,31 \times 10^2$	$1,22 \times 10^2$
700	$1,87 \times 10^2$	$0,92 \times 10^1$
750	$1,16 \times 10^2$	$0,76 \times 10^1$
800	$9,80 \times 10^1$	$0,52 \times 10^1$
850	$7,40 \times 10^1$	$0,14 \times 10^1$

D.4 Nilai resistansi  $R_{\text{grain}}$  dan  $R_{\text{gb}}$  untuk sampel P + B variasi temperatur

Temperature ( $^{\circ}\text{C}$ )	$R_{\text{grain}}$ (ohm)	$R_{\text{gb}}$ (ohm)
100	$2,34 \times 10^9$	0
150	$3,65 \times 10^8$	0
200	$2,13 \times 10^7$	$1,07 \times 10^7$
250	$1,85 \times 10^6$	$2,60 \times 10^6$
300	$1,69 \times 10^5$	$3,38 \times 10^5$
350	$3,86 \times 10^4$	$3,94 \times 10^4$
400	$1,05 \times 10^4$	$4,80 \times 10^3$
450	$3,57 \times 10^3$	$1,04 \times 10^3$
500	$1,19 \times 10^3$	$5,15 \times 10^2$
550	$3,71 \times 10^2$	$1,37 \times 10^2$
600	$1,58 \times 10^2$	$9,38 \times 10^1$
650	$1,12 \times 10^1$	$2,66 \times 10^1$
700	$9,74 \times 10^1$	$1,14 \times 10^1$
750	$8,20 \times 10^1$	$0,46 \times 10^1$
800	$5,08 \times 10^1$	$0,36 \times 10^1$
850	$3,24 \times 10^1$	$0,28 \times 10^1$

**“Halaman ini sengaja dikosongkan”**

## LAMPIRAN E

### SLOPE UNTUK PERHITUNGAN ENERGI AKTIVASI

#### E.1 Nilai Persamaan regresi linier

Persamaan regresi linier untuk butir pada sampel TP adalah sebagai berikut:

$$\ln \sigma = - \left\{ \frac{E_a}{kT} \right\} + \ln \sigma_0$$

$$y = Ax + B$$

$$y = -11101,189 x + 463,93698$$

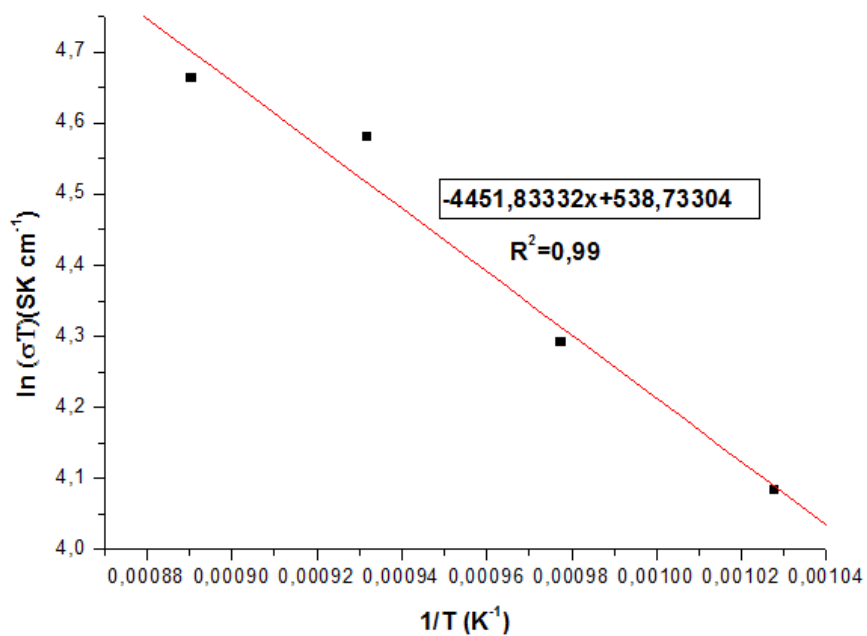
$$A = - \left\{ \frac{E_a}{k} \right\}$$

$E_a = -A.k$ , dengan  $k$ =konstanta Boltzmann

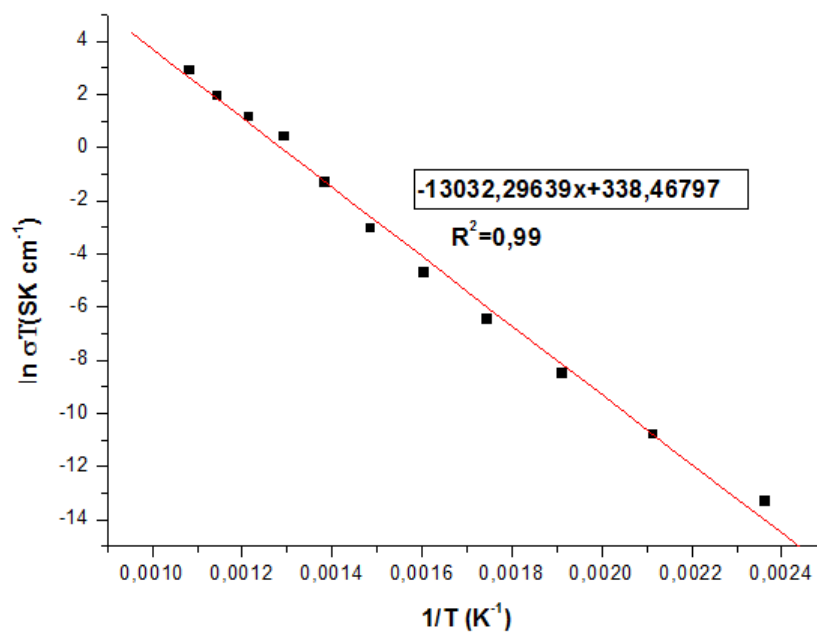
$$E_a = -(-11851,07054).(1,38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}) / (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})$$

$$E_a = 1,02 \text{ eV}$$

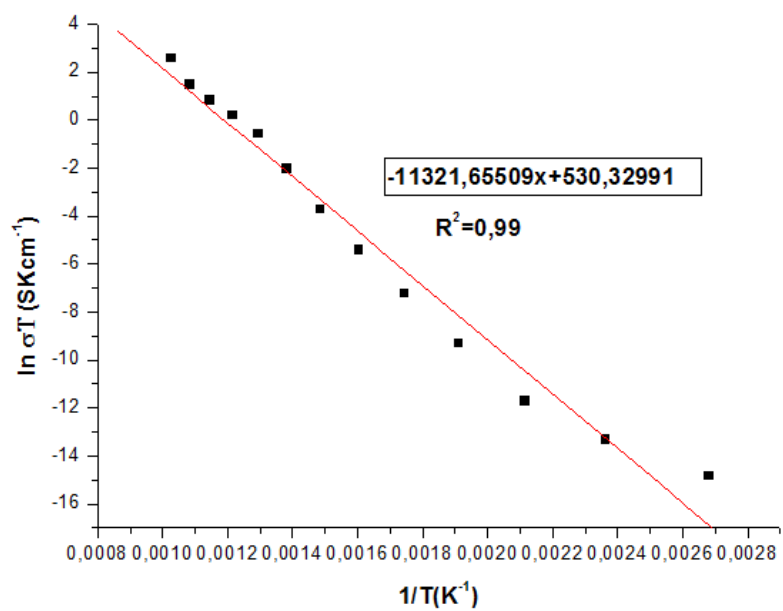
#### E.2 SAMPEL 8YSZ BUTIR DAERAH 1



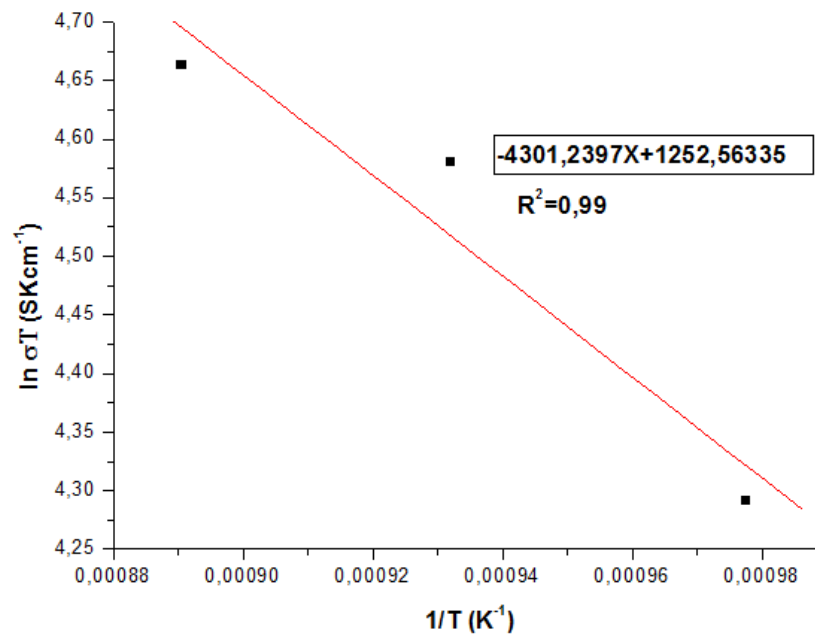
### E.3 SAMPEL 8YSZ T BUTIR DAERAH II



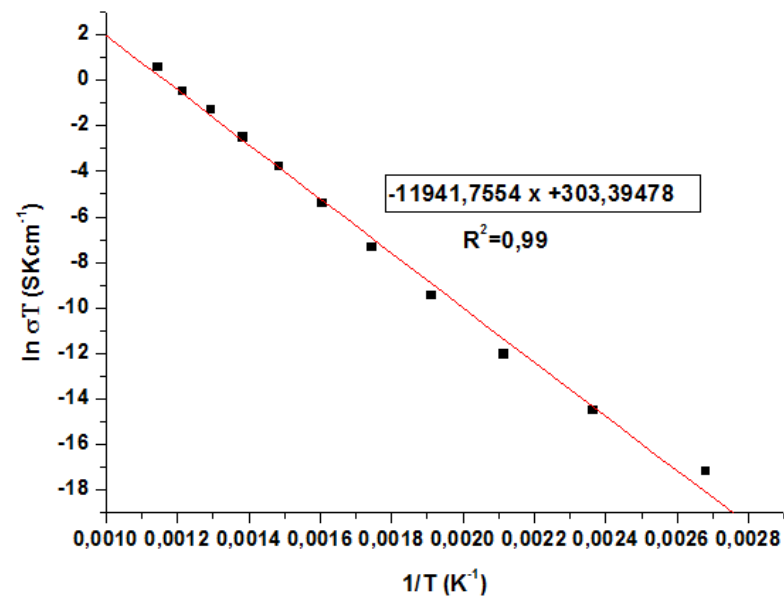
### E.4 SAMPEL 8YSZ BUTIR+BATAS BUTIR DAERAH 1



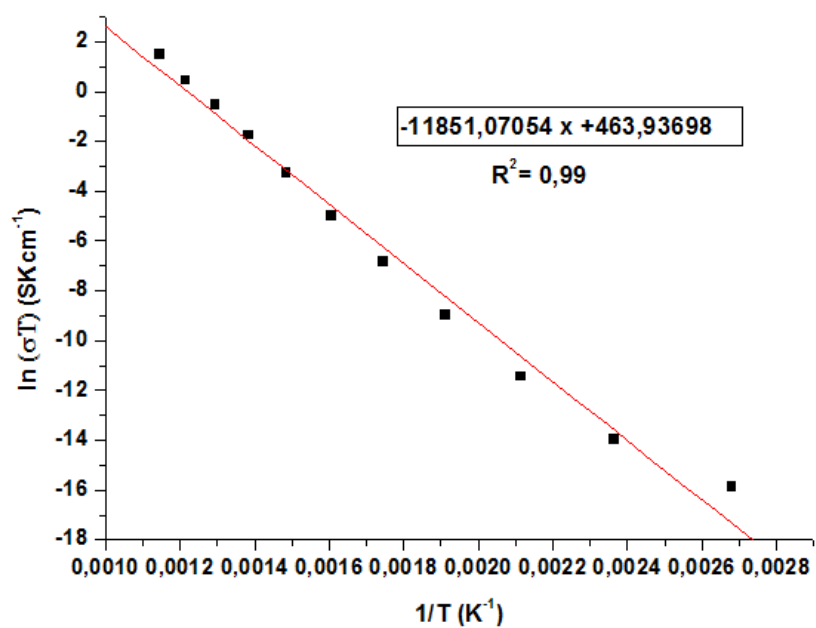
### E.5 SAMPEL 8YSZ BUTIR+BATAS BUTIR DAERAH II



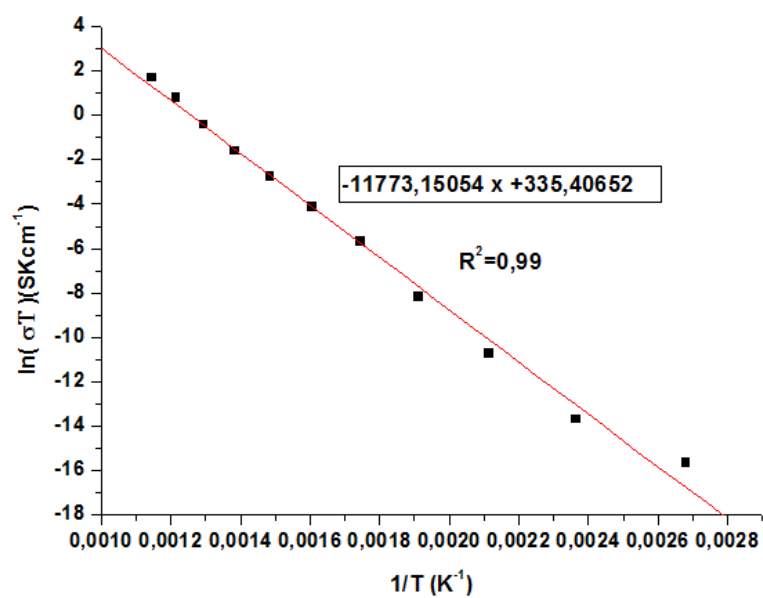
### E.6 PEMANASAN



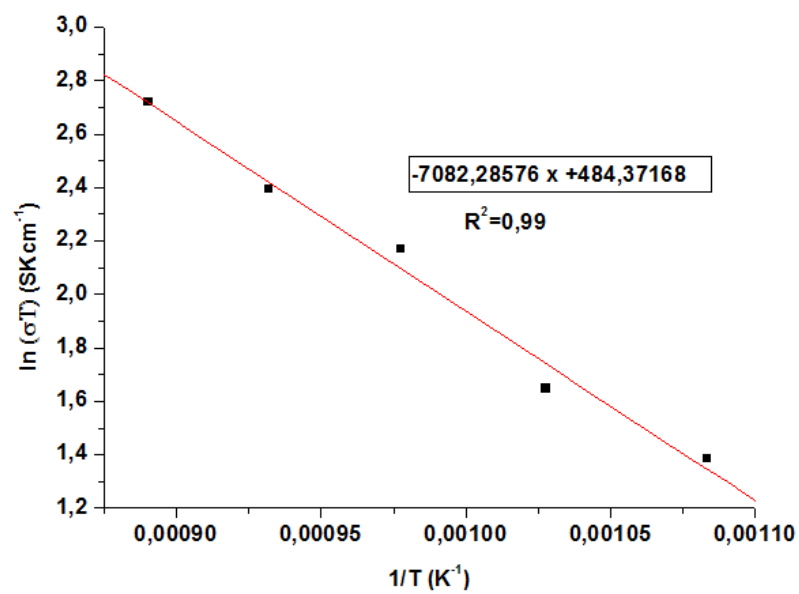
## E.7 TANPA PEMANASAN (TP)



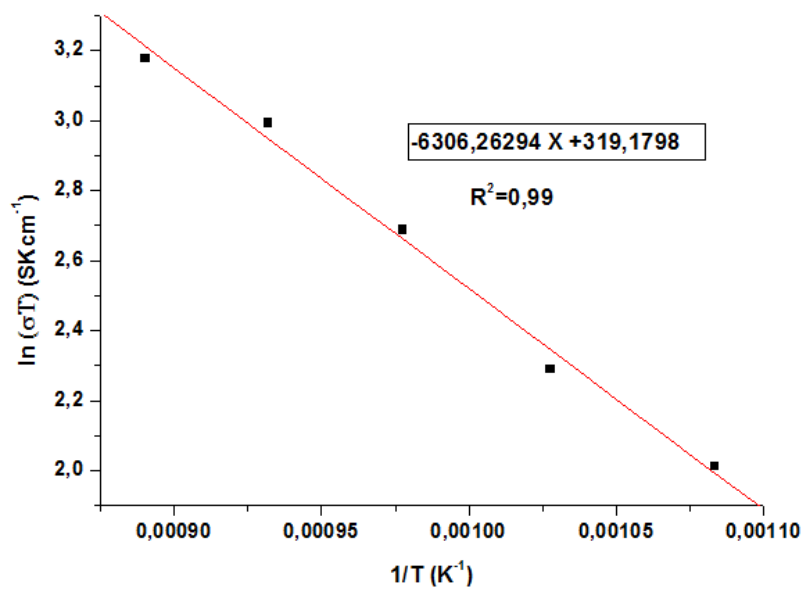
## E.8 P+B



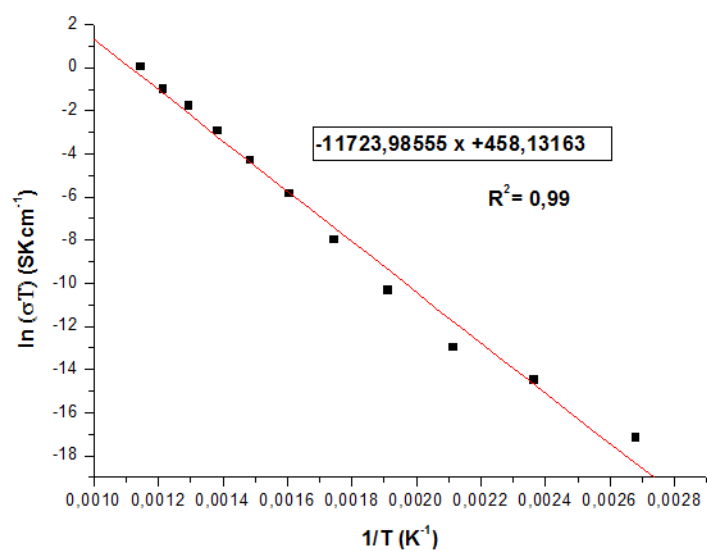
## E.9 PEMANASAN DAERAH 2



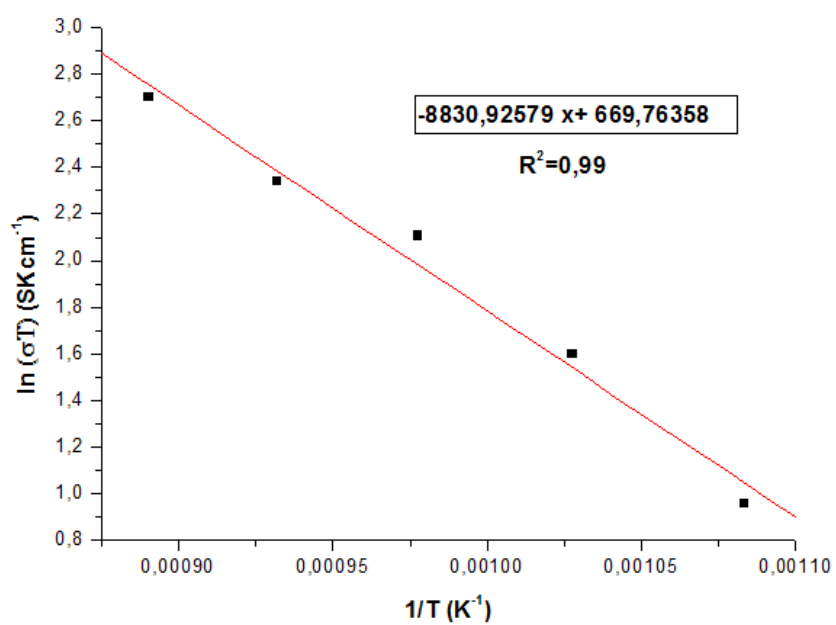
## E.10 TANPA PEMANASAN DAERAH 2



**BUTIR+BATAS BUTIR**  
**E.11 PEMANASAN daerah 1**

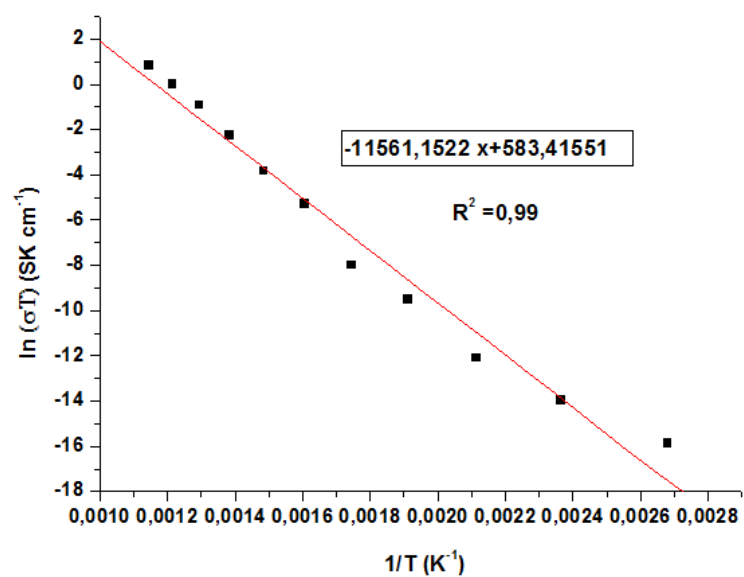


**E.12 PEMANASAN DAERAH 2**

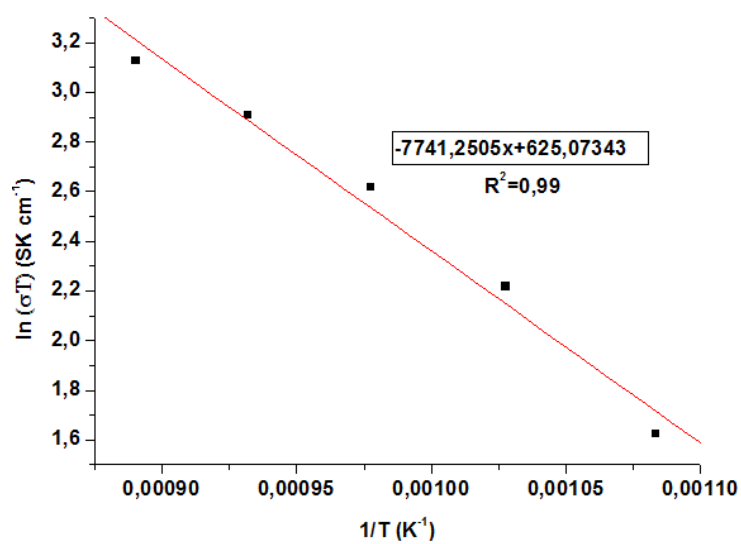




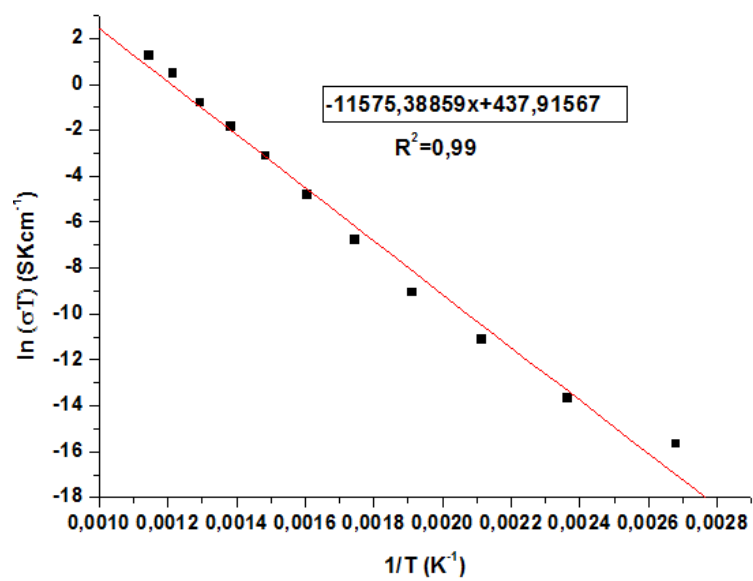
### E.13 TANPA PEMANASAN DAERAH 1



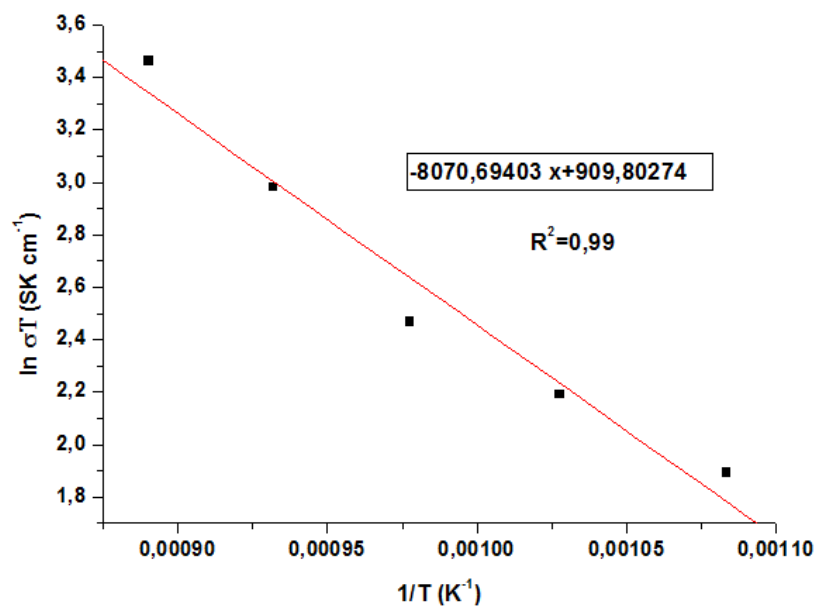
### E.14 TANPA PEMANASAN DAERAH 2



### E.15 P+B DAERAH 1



### E.16 P+B DAERAH II



## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil analisis yang telah dilakukan selama penelitian diperoleh kesimpulan sebagai berikut:

1. Elektrolit 8YSZ memiliki fasa tunggal c-YSZ pada  $T = 1550\text{ }^{\circ}\text{C}$  yang ditahan selama 4 jam. Parameter kisi yang dimiliki c-YSZ sebesar  $5,1385\text{ \AA}$ . Energi aktivasi yang dimiliki sampel 8YSZ pada  $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,38 \pm 0,05\text{ eV}$  dan  $T < 700\text{ }^{\circ}\text{C}$   $E_a \text{ butir} = 1,12 \pm 0,02\text{ eV}$ . Daerah  $T > 700\text{ }^{\circ}\text{C}$  merupakan daerah temperatur kerja 8YSZ sebagai elektrolit SOFC.
2. Elektrolit  $\text{CeO}_2$  yang didoping 20 mol %  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  dapat digunakan sebagai elektrolit SOFC. Elektrolit  $\text{CeO}_2$  yang didoping 20 mol %  $\text{Yb}_2\text{O}_3$  memiliki karakteristik sebagai berikut:
  - a. Fasa tunggal  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  terbentuk pada temperatur  $1300\text{ }^{\circ}\text{C}$  yang ditahan selama 16 jam dengan Parameter kisi yang dimiliki sampel P ( $a = 5,3939\text{ \AA}$ ) dan sampel TP ( $a = 5,3169\text{ \AA}$ ).
  - b. Energi aktivasi yang dimiliki sampel P pada  $T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,61 \pm 0,04\text{ eV}$  dan  $T < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 1,03 \pm 0,03\text{ eV}$  sedangkan sampel TP pada  $T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 0,54 \pm 0,03\text{ eV}$  and  $T < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,  $E_a \text{ butir} = 1,02 \pm 0,04\text{ eV}$ .
  - c. Daerah  $T > 650\text{ }^{\circ}\text{C}$  merupakan daerah temperatur kerja  $\text{Yb}_{0,20}\text{Ce}_{0,8}\text{O}_{1,90}$  sebagai elektrolit SOFC.
3. Penambahan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  mengakibatkan terbentuknya fasa baru  $\text{CeO}_2$  kubik dengan parameter kisi ( $a = 5,4254\text{ \AA}$ ) dan  $\text{Bi}_5\text{Yb}_3\text{O}_{12}$  kubik dengan parameter kisi ( $a = 10,5343\text{ \AA}$ ). Penambahan 4 mol %  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  menurunkan energi aktivasi butir sebesar  $0,02\text{ eV}$  pada  $T < 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

## 5.2 Saran

Penelitian dilanjutkan dengan suhu sinter yang relatif tinggi (1550 °C) dan juga variasi konsentrasi  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  dilakukan. Tujuan Variasi yang diberikan adalah untuk melihat nilai konduktivitas terhadap persentase *co-firing* yang diberikan.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abelard, P., dan J. F. Baumard. 2009. "The electrical conductivity of cubic stabilized zirconia: The results of an IUPAC collaborative study (Technical Report)." *Pure and Applied Chemistry* 67 (11): 1891–1904.
- Alaswad, A., A. Palumbo, M. Dassisti, dan A. G. Olabi. 2016. "Fuel Cell Technologies, Applications, and State of the Art. A Reference Guide." In *Reference Module in Materials Science and Materials Engineering*. (Elsevier), p.
- Andersson, David A., Sergei I. Simak, Natalia V. Skorodumova, Igor A. Abrikosov, dan Börje Johansson. 2006. "Optimization of Ionic Conductivity in Doped Ceria." *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 103 (10): 3518–21
- Barsoum, Michel, dan M. W. Barsoum. 2002. *Fundamentals of Ceramics*. CRC Press.
- Bauer, Nico, Jérôme Hilaire, Robert J. Brecha, Jae Edmonds, Kejun Jiang, Elmar Kriegler, Hans-Holger Rogner, dan Fabio Sferra. 2016. "Assessing global fossil fuel availability in a scenario framework." *Energy* 111 (September): 580–92.
- Bilgen, S. 2014. "Structure and environmental impact of global energy consumption." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 38 (Oktober): 890–902.
- Broseghini, M., L. Gelisio, M. D'Incau, C. L. Azanza Ricardo, N. M. Pugno, dan P. Scardi. 2016. "Modeling of the planetary ball-milling process: The case study of ceramic powders." *Journal of the European Ceramic Society*, CERMODEL 2015 Modelling and simulation meet innovation in Ceramics TechnologyCermode 2015: Modelling and Simulation Meet Innovation in Ceramics Technology, 36 (9): 2205–12.
- Carter, C. Barry, dan M. Grant Norton. 2013. *Ceramic Materials: Science and Engineering*. Springer Science & Business Media.
- Chiang, Yet-Ming, Dunbar P. Birnie, dan W. David Kingery. 1996. *Physical Ceramics: Principles for Ceramic Science and Engineering*. Wiley.
- Esther Jeyanthi, C., R. Siddheswaran, Pushpendra Kumar, M. Karl Chinnu, K. Rajarajan, dan R. Jayavel. 2015. "Investigation on synthesis, structure, morphology, spectroscopic and electrochemical studies of praseodymium-doped ceria nanoparticles by combustion method." *Materials Chemistry and Physics* 151 (Februari): 22–28.
- Fergus, Jeffrey, Rob Hui, Xianguo Li, David P. Wilkinson, dan Jiujun Zhang. 2008. *Solid Oxide Fuel Cells: Materials Properties and Performance*. CRC Press.
- Fu, Yen-Pei, Chien-Wei Tseng, dan Po-Chin Peng. 2008. "Effect of bismuth addition on the electrical conductivity of gadolinium-doped ceria ceramics." *Journal of the European Ceramic Society* 28 (1): 85–90.
- Ginley, David S., dan David Cahen. 2012. *Fundamentals of Materials for Energy and Environmental Sustainability*. Cambridge University Press.
- Guan, Lili, Shiru Le, Xiaodong Zhu, Shaofei He, dan Kening Sun. 2015. "Densification and grain growth behavior study of trivalent MO<sub>1.5</sub> (M = Gd,

- Bi) doped ceria systems.” *Journal of the European Ceramic Society* 35 (10): 2815–21.
- Han, Minfang, Xiuling Tang, Huiyan Yin, dan Suping Peng. 2007. “Fabrication, microstructure and properties of a YSZ electrolyte for SOFCs.” *Journal of Power Sources*, IBA – HBC 2006 Selected papers from the international battery association & hawaii battery conference 2006 Waikoloa, Hawaii, USA 9-12 January 2006, 165 (2): 757–63..
- Jaiswal, Nandini, Brijesh Gupta, Devendra Kumar, dan Om Parkash. 2015. “Effect of addition of erbium stabilized bismuth oxide on the conductivity of lanthanum doped ceria solid electrolyte for IT-SOFCs.” *Journal of Alloys and Compounds* 633 (Juni): 174–82.
- Kazlauskas, Saulius, Algimantas Kežionis, Tomas Šalkus, dan Antanas Feliksas Orliukas. 2012. “Sintering of oxygen ion conductive ceramics and their electrical properties.” *Lithuanian Journal of Physics* 52 (3): 231–37.
- Kim, Gihyun, Naesung Lee, Ki-Beum Kim, Byung-Kook Kim, Hyejung Chang, Song-Ju Song, dan Jun-Young Park. 2013. “Various synthesis methods of aliovalent-doped ceria and their electrical properties for intermediate temperature solid oxide electrolytes.” *International Journal of Hydrogen Energy*, 2011 Zing International Hydrogen and Fuel Cells Conference: from Nanomaterials to Demonstrators, 38 (3): 1571–87.
- Lasia, Andrzej. 2014. *Electrochemical Impedance Spectroscopy and Its Applications*. Springer
- Leng, Y. J, S. H Chan, S. P Jiang, dan K. A Khor. 2004. “Low-temperature SOFC with thin film GDC electrolyte prepared in situ by solid-state reaction.” *Solid State Ionics* 170 (1–2): 9–15.
- Małecka, Małgorzata A., dan Leszek Kępiński. 2012. “Solid state reactions of nanocrystalline Ce<sub>0.5</sub>Yb<sub>0.5</sub>O<sub>1.75</sub> mixed oxide with high surface area silica in oxidizing and reducing atmosphere.” *Journal of Solid State Chemistry* 192 (Agustus): 221–28.
- Mandal, Balaji P., V. Grover, dan A. K. Tyagi. 2006. “Phase relations, lattice thermal expansion in Ce<sub>1-x</sub>Eu<sub>x</sub>O<sub>2-x/2</sub> and Ce<sub>1-x</sub>Sm<sub>x</sub>O<sub>2-x/2</sub> systems and stabilization of cubic RE<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (RE: Eu, Sm).” *Materials Science and Engineering: A* 430 (1–2): 120–24. doi:10.1016/j.msea.2006.05.140.
- Matović, B., M. Stojmenović, J. Pantić, A. Varela, M. Žunić, N. Jiraborvornpongsa, dan T. Yano. 2014. “Electrical and microstructural properties of Yb-doped CeO<sub>2</sub>.” *Journal of Asian Ceramic Societies* 2 (2): 117–22.
- Milewski, Jarek, Konrad Świrski, Massimo Santarelli, dan Pierluigi Leone. 2011. *Advanced Methods of Solid Oxide Fuel Cell Modeling*. Springer Science & Business Media.
- Minh, N. Q., dan T. Takahashi. 1995. *Science and Technology of Ceramic Fuel Cells*. Elsevier.
- Moulson, A. J., dan J. M. Herbert. 2003. *Electroceramics: Materials, Properties, Applications*. John Wiley & Sons.
- Nigara, Y, K Yashiro, T Kawada, dan J Mizusaki. 2001. “The atomic hydrogen permeability in (CeO<sub>2</sub>)<sub>0.85</sub>(CaO)<sub>0.15</sub> at high temperatures.” *Solid State Ionics*, Proceedings of the 10th International Conference on Solid State Protonic Conductors, 145 (1–4): 365–70.

- Raghvendra, dan Prabhakar Singh. 2015. "Influence of  $\text{Bi}_2\text{O}_3$  additive on the electrical conductivity of calcia stabilized zirconia solid electrolyte." *Journal of the European Ceramic Society* 35 (5): 1485–93.
- Rahaman, Mohamed N. 2003. *Ceramic Processing and Sintering*. CRC Press.
- Ren, Cong, Tong Liu, Yating Mao, Panita Maturavongsadit, Jittima Amie Luckanagul, Qian Wang, dan Fanglin Chen. 2014. "Effect of casting slurry composition on anode support microstructure and cell performance of MT-SOFCs by phase inversion method." *Electrochimica Acta* 149 (Desember): 159–66.
- Rockenhäuser, Christian. 2015. *Electron Microscopical Investigation of Interdiffusion and Phase Formation at  $\text{Gd}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ - and  $\text{Sm}_2\text{O}_3/\text{CeO}_2$ -Interfaces*. Springer.
- Salogni, A., dan P. Colonna. 2010. "Modeling of solid oxide fuel cells for dynamic simulations of integrated systems." *Applied Thermal Engineering* 30 (5): 464–77. doi:10.1016/j.applthermaleng.2009.10.007.
- Sebastian, Mailadil Thomas, Hong Wang, dan Heli Jantunen. 2016. "Low temperature co-fired ceramics with ultra-low sintering temperature: A review." *Current Opinion in Solid State and Materials Science* 20 (3): 151–70.
- Singhal, Subhash C., M. Dokiya, Electrochemical Society High Temperature Materials Division, Electrochemical Society Battery Division, Electrochemical Society Energy Technology Division, dan SOFC Society of Japan. 2003. *Solid Oxide Fuel Cells VIII: (SOFC VIII): Proceedings of the International Symposium*. The Electrochemical Society.
- Shri Prakash, B., S. Senthil Kumar, dan S. T. Aruna. 2014. "Properties and development of Ni/YSZ as an anode material in solid oxide fuel cell: A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 36 (Agustus): 149–79.
- Stojmenović, M., S. Bošković, M. Žunić, J. A. Varela, M. Prekajski, B. Matović, dan S. Mentus. 2014. "Electrical properties of multidoped ceria." *Ceramics International* 40 (7, Part A): 9285–92.
- Tian, Ning, Ji Yu, Yufu Deng, Guannan Li, dan Xiangwei Zhang. 2016. "Electrical properties of  $\text{Ce}_{0.85}\text{Sm}_{0.15}\text{O}_{1.925}\text{--Fe}_2\text{O}_3$  electrolytes for IT-SOFCs." *Journal of Alloys and Compounds* 655 (Januari): 215–19.
- Uimonen, Semen, Toni Tukia, Marja-Liisa Siikonen, Dirk Lange, Claudio Donghi, Xiao Liang Cai, Hannu Nousu, Harri Hakala, dan Matti Lehtonen. 2016. "Energy consumption of escalators in low traffic environment." *Energy and Buildings* 125 (Agustus): 287–97.
- Van Gestel, Tim, Doris Sebold, dan Hans Peter Buchkremer. 2015. "Processing of 8YSZ and CGO thin film electrolyte layers for intermediate- and low-temperature SOFCs." *Journal of the European Ceramic Society* 35 (5): 1505–15.
- Wang, Fang, Qingjun Zhou, Tianmin He, Guodong Li, dan Hong Ding. 2010. "Novel  $\text{SrCo}_{1-y}\text{Nb}_y\text{O}_{3-\delta}$  cathodes for intermediate-temperature solid oxide fuel cells." *Journal of Power Sources* 195 (12): 3772–78.
- Yang, Jie, Bifa Ji, Jingyu Si, Quanzheng Zhang, Qiyi Yin, Jingsong Xie, dan Changan Tian. 2016. "Synthesis and properties of ceria based electrolyte for IT-SOFCs." *International Journal of Hydrogen Energy*.

- Ye, Fei, Toshiyuki Mori, Ding Rong Ou, Motoi Takahashi, Jin Zou, dan John Drennan. 2007. "Ionic Conductivities and Microstructures of Ytterbium-Doped Ceria." *Journal of The Electrochemical Society* 154 (2): B180–85.
- Zakeri, M., M. Razavi, M. R. Rahimipour, dan B. Jamal Abbasi. 2014. "Effect of ball to powder ratio on the ZrO<sub>2</sub> phase transformations during milling." *Physica B: Condensed Matter* 444 (Juli): 49–53.
- Zhang, Chao, Chang-Jiu Li, Ga Zhang, Xian-Jin Ning, Cheng-Xin Li, Hanlin Liao, dan Christain Coddet. 2007. "Ionic conductivity and its temperature dependence of atmospheric plasma-sprayed yttria stabilized zirconia electrolyte." *Materials Science and Engineering: B* 137 (1–3): 24–30.
- Zhang, Jingjing. 2015. "Carbon emission, energy consumption and intermediate goods trade: A regional study of East Asia." *Energy Policy* 86 (November): 118–22.
- Zhu, Qingshan, dan Baoan Fan. 2005. "Low temperature sintering of 8YSZ electrolyte film for intermediate temperature solid oxide fuel cells." *Solid State Ionics* 176 (9–10): 889–94.



## BIOGRAFI PENULIS



Budiana dilahirkan di kabupaten Tasikmalaya Selatan provinsi Jawa barat pada tanggal 13 Januari 1992. Budiana dilahirkan dari 3 orang bersaudara dengan nama keluarga (Soha Budiana Win Sa). Anak ketiga dari bapak Muhamad Ipin saripin dan dari ibu Mamah Mulyana. Penulis menempuh pendidikan formal di MI Al-Ikhlash Cicadas, Majelis Al-quraan Yayasan Al-Hikamah Cisempur, SDN 1 Cibatuireng, SMPN 1 Karangnunggal, SMAN 1 Karangnunggal dan S1 Fisika bidang material di ITS Surabaya. Penulis mendapatkan kesempatan untuk kuliah paska sarjana melalui beasiswa LPDP prestasi yang diberikan oleh pemerintah Republik Indonesia melalui Departemen Keuangan. Selama kuliah S2, penulis aktif melakukan kegiatan bakti negeri bersama jajaran awarde LPDP Surabaya, aktif mengikuti kegiatan karate di lembaga minat dan bakat ITS, aktif melakukan kegiatan kesenian (Kecapi dan suling Sunda), aktif melakukan kegiatan keorganisasian di Himpunan paska sarjana ITS bidang informasi dan komunikasi. Pertemuan ilmiah yang telah dilakukan selama S2 adalah *conference APS* di Bandung pada tanggal 22-23 Agustus 2015. Paper yang disampaikan penulis dengan judul *Preparation and Conductivity of 7-8 mol% YSZ and 12 mol %CSZ for electrolyte SOFC*.